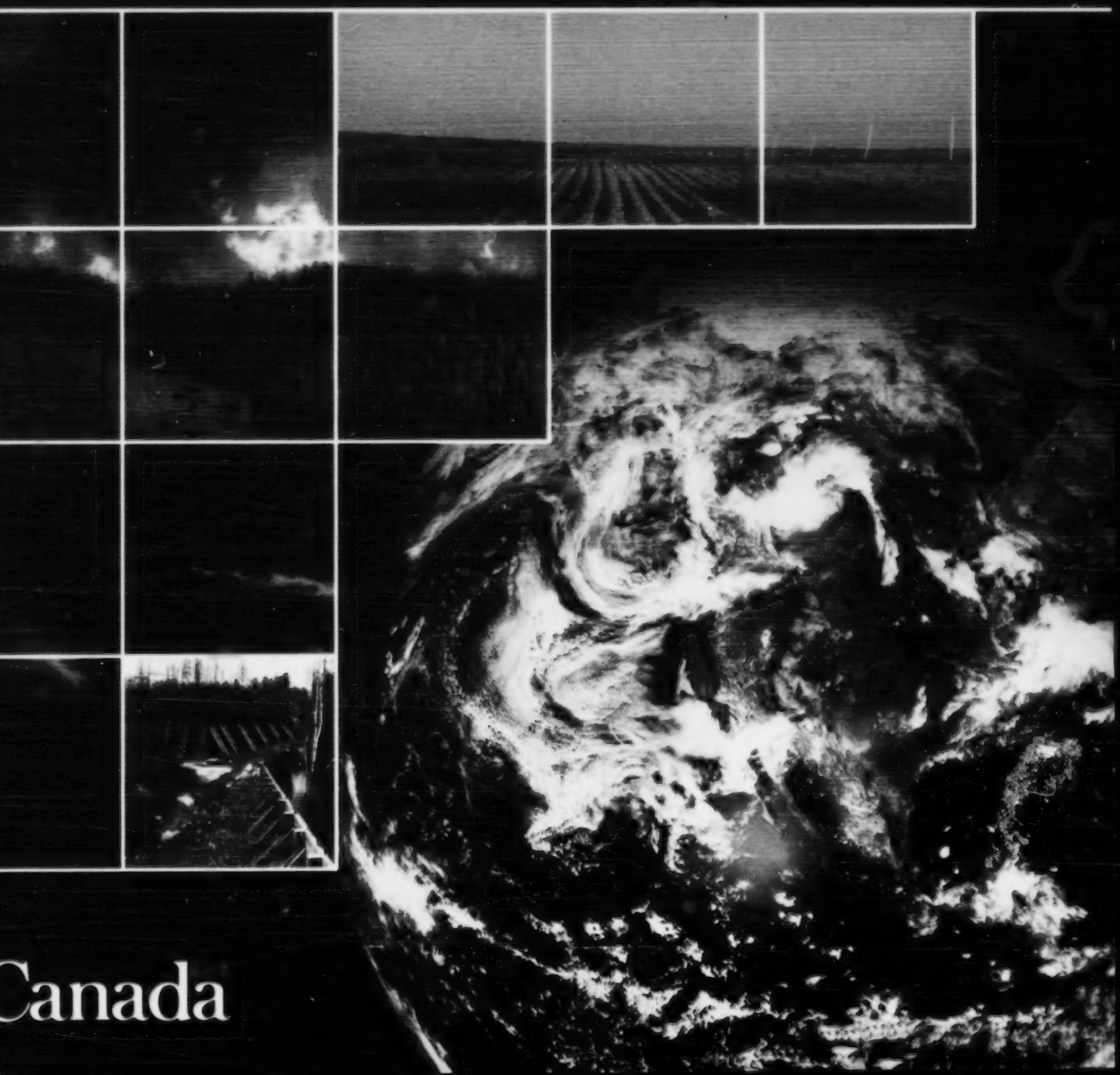
Amélioration des puits de gaz à effet de serre :

Évaluation scientifique canadienne

PRDE PON 6.2.1 DERNIER RAPPORT



Canada

Amélioration des puits de gaz à effet de serre :

Évaluation scientifique canadienne

Dirigée par

Henry Hengeveld
EC

Leah Braithwaite
MPO

Raymond Desjardins
AAC

John Gorjup
BRDE

Peter Hall
SCF

PRDE PON 6.2.1 DERNIER RAPPORT

Le présent rappport est disponible en format électronique sur le site Web à l'adresse

www.msc.ec.gc.ca/education/scienceofclimatechange/index_f.html et
www2.nrcan.gc.ca/es/oerd/francais/view.asp?x=1505

Pour obtenir gratuitement des copies papier, prière de s'adresser par écrit à :

Section de l'évaluation et de l'intégration des sciences atmosphériques
Environnement Canada
4905, rue Dufferin
Toronto (Ontario)
M3H 5T4

Téléphone : 416-739-5831

Publié avec l'autorisation du ministre de l'Environnement
© Ministre des Travaux publics et des Services gouvernementaux
Canada 2008

ISBN 978-0-662-08625-3
N° de catalogue En56-223/2008F

Concours financier du Groupe de recherche et de développement énergétiques

Also available in English

Imprimée sur papier recyclé

Référence photographique pour la page couverture : NASA globe_west_2048;
http://eol.jsc.nasa.gov

Photos intercalaires : Environnement Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada,
Ressources naturelles Canada et Pêches et Océans Canada

REMERCIEMENTS

Ce rapport était rédigé par l'équipe de leadership du PRDE PON 6.2.1, compris de **Rick Bourbonniere (Environnement Canada), Leah Braithwaite (Pêches et Océans Canada), Wenjun Chen (Ressources naturelles Canada), Raymond Desjardins (Agriculture et Agroalimentaire Canada), John Gorjup (Bureau de la recherche et du développement énergétiques), Peter Hall (Ressources naturelles Canada) et Henry Hengeveld (Environnement Canada).** L'équipe tienne a remercier les anciens membres, y compris Christian De Kimpe et Barry Grace de AAC, Dick Stoddard, Doug Bancroft, Peggy Tsang et Georgina Lloyd de MPO, et Ron Brown, Joseph Cihlar, Jennifer Kerr, et Bob Stewart, tous de RNCan.

L'equipe tienne à remercier les nombreux autres scientifiques d'AAC, d'EC, de MPO et RNCan qui ont contribuées aux recherches sur les puits de gaz à effet de serre financiée par le PRDE pendant les dernier yingt-cinq ans. Y compris les scientifiques de AAC D. Angers, M. Boehm, M. Carter, C. Drury, B. Ellert, E. Gregorich, H. Janzen, R. Lemke, B. McConkey, M. Monreal, E. Pattey, P. Rochette , W. Smith et B.J. Zebarth; ceux de MPO K. Azetsu-Scott, B. Casault, A. Clarke, H. Freeland, G. Harrison, E. Head, R. Hesslein, W. Johnson, E.P. Jones, P. Kepkay, W. Li, Y. Lu, H. Maass, R. Matear, M. Pahlow, M. Peña, C. Sabine, A. Vézina, F. Whitney, C.S. Wong et D. Wright; ceux de EC A. Barr, K. Higuchi et Diana Verseghy; et scientifiques de RNCan E. Banfield, F. Beall, P. Bernier, J.Bhatti, R.Boutin, W. deGroot, M. Flannigan, Rich Fleming, Rob Fleming, N. Foster, P. Hazlett, T. Hogg, W. Kurz, M. Lavigne, M. Moroni, D. Pare, K. Percy, C. Preston, David Price et T. Trofymow.

Plusiers d'eux ont aussi participées à la révision des chapitres diverses de ce rapport.

Finalement, l'équipe tienne à exprimer sa reconnaissance envers les personnelles de BRDE des années d'encouragement et d'aide financière pour ce programme.

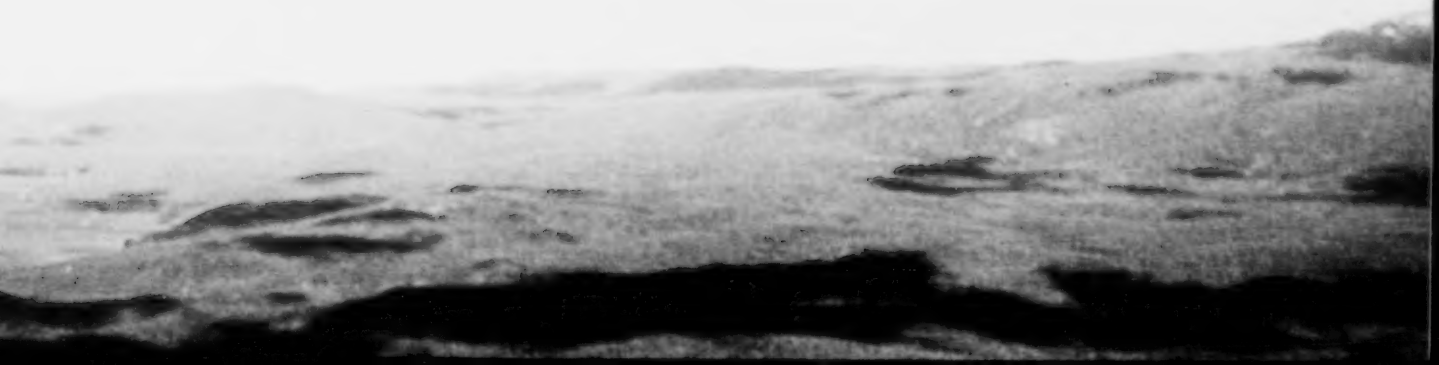


TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS i

CHAPITRE 1 Aperçu des connaissances scientifiques et des objectifs des activités canadiennes de recherches pertinentes pour l'amélioration des puits de gaz à effet de serre au Canada 1

1.1 Introduction 2

1.2 Le cycle mondial du carbone

1.2.1 Les réservoirs mondiaux préindustriels de carbone et leurs flux annuels 2
1.2.2 Influence de l'humain sur le bilan mondial du carbone 3
1.2.3 Influences de l'humain sur le bilan mondial du méthane 5

1.3 Cycle mondial de l'azote 6

1.3.1 Bilan mondial de l'oxyde de diazote 6
1.3.2 Émissions mondiales des oxydes d'azote et d'ammoniac 7

1.4 Le cycle du carbone dans les écosystèmes du Canada et les océans qui le bordent 7

1.4.1 Les terres agricoles du Canada 7
1.4.2 Les forêts du Canada 8
1.4.3 Les zones humides et les tourbières du Canada 9
1.4.4 Les océans du Canada 9

1.5 L'amélioration des puits de gaz à effet de serre – un objectif du gouvernement canadien 10

1.6 Stratégie de recherche sur le programme au niveau de l'objectif 6.2.1 de l'Amélioration des puits de gaz à effet de serre 13

1.6.1 Puits que constituent les forêts 14
1.6.2 Puits que constituent les sols agricoles 15
1.6.3 Puits que constituent les océans 16
1.6.4 Les réservoirs hydroélectriques 17

CHAPITRE 2 Comment transformer les terres agricoles Canadiennes d'emettrices a puits de ges 19

2.1 Introduction 19

2.2 Émissions passées, présentes et futures au Canada 20

2.3 Options pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et/ou augmenter les puits de carbone dans les terres agricoles du Canada 23

2.3.1 Dioxyde de carbone (CO_2) 23
2.3.2 Oxyde de diazote (N_2O) 25
2.3.3 Méthane (CH_4) 27

2.4 Incidences globales des stratégies d'atténuation des GES 28

2.5 Où en sommes-nous par rapport à l'objectif 6.2.1? 30

CHAPITRE 3 Les forêts du Canada – sources ou puits de carbone? 37

3.1 Introduction 37

3.2 Émissions de gaz à effet de serre provenant des forêts canadiennes 39

3.2.1 Utilisation et gestion des forêts dans le passé en tant que source ou puits de carbone atmosphérique 39
3.2.2 Émissions des forêts canadiennes 42
3.2.3 Rôle des perturbations naturelles et des rétroactions climatiques dans les flux actuels et futurs 44

3.3 Quelles sont les options permettant de réduire les émissions ou de renforcer les puits? 45

3.3.1 Contexte 45
3.3.2 Options de gestion forestière pour réduire les émissions et améliorer les puits 37

3.4 Recherches sur le bilan du carbone forestier au Canada et défis soulevés par les déclarations au Protocole de Kyoto/PRDE. 48

3.5 Où en sommes-nous dans l'atteinte des objectifs de la section 6.2.1 du programme au niveau de l'objectif (PON)? 50

CHAPITRE 4 Améliorer les puits biologiques des océans : est-ce faisable? 57

4.1 Introduction 57

4.2 Le rôle des océans nordiques comme sources et puits de gaz à effet de serre 59

4.2.1 Flux de carbone dans les régions de l'Atlantique Nord et de l'Arctique 60
4.2.2 Le carbone dans le Pacifique Nord 66

4.2.3 Séquestration de CO_2 dans l'océan grâce à la fertilisation par le fer – qu'avons-nous appris? 69
4.2.4 Impact du PRDE sur le développement de modèles au CCmaC (Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat) 71

4.3 Dans quelle mesure avons-nous atteint les objectifs du PON 6.2.1? 71

CHAPITRE 5 Les émissions de gaz à effet de serre issues d'aménagements hydroélectriques au Canada 77

5.1 Introduction 77

5.2 Programme de recherche du PRDE concernant les émissions de gaz à effet de serre issues des réservoirs hydroélectriques 78

5.2.1 Études menées dans la région des lacs expérimentaux 79
5.2.2 Élaboration d'une méthodologie et d'un modèle pour l'inventoriage détaillé des flux de GES dans les systèmes hydroélectriques existants 83
5.2.3 Modélisation des flux de GES 86
5.2.4 Communication des résultats aux intervenants et aux décideurs 86

5.3 Les objectifs du PRDE ont-ils été atteints? 87

CHAPITRE 6 Priorités des recherches à venir sur les puits de gaz à effet de serre au Canada 89

6.1 Introduction 90

6.2 Priorités de recherche par secteur 90

6.2.1 Agriculture 90
6.2.2 Forêts 92
6.2.3 Océans 94
6.2.4 Émissions provenant des réservoirs hydroélectriques 94

6.3 Coordination et financement 95

ACRONYMES, ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES CHEMIQUES 99

AVANT-PROPOS

Pour le public canadien, l'environnement est récemment devenu un important sujet de préoccupation. Il semble que tout le monde demande des actions immédiates. C'est pourquoi cette question est également une grande priorité pour les gouvernements du Canada.

Cependant, il n'est pas toujours facile de déterminer quelle action est la bonne. Et c'est dans ce domaine en particulier que les décideurs des gouvernements doivent se tourner vers la communauté scientifique pour obtenir des avis basés sur les meilleures recherches disponibles.

Un des plus graves problèmes environnementaux auxquels sont aujourd'hui confrontés tous les gouvernements est celui du changement climatique, et la plus grande question qui se pose est la suivante : « Comment les gouvernements peuvent-ils le mieux réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer les processus qui aident à les extraire de l'atmosphère, pour à terme en stabiliser les concentrations atmosphériques à un niveau qui évite un changement climatique dangereux? ».

C'est la communauté scientifique qui a été la première à signaler le péril du changement climatique. C'est elle aussi qui doit aider les décideurs à savoir quelles actions prendre face à ce problème.

De toute évidence, les mesures destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre de nos activités humaines doivent figurer en premier lieu dans la réaction. Cependant, une autre option est de mettre en œuvre des actions qui peuvent extraire de l'atmosphère les gaz à effet de serre excédentaires pour les retourner dans les réservoirs naturels des terres et des océans. Pour comprendre quelles pourraient être ces mesures, leurs chances de succès et comment quantifier les quantités de gaz ainsi séquestrées, on doit disposer d'informations scientifiques.

Le Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE) a financé des recherches connexes à ces sujets au Canada pendant plus de vingt ans. Selon les normes du PRDE, le chemin a été long jusqu'à ce point. Les efforts ont débuté en 1981, il y a donc plus de 25 ans, lorsque Bryan Cook et John Legg, tous deux du Bureau de la recherche et du développement énergétiques, ont commencé à réaliser que le changement climatique n'était pas qu'une simple question académique à réserver aux discussions des scientifiques, mais qu'il aurait un jour des implications majeures pour les politiques énergétiques du Canada. En collaboration avec Environnement Canada, ils ont soumis au PRDE une proposition de financement d'un poste de conseiller en matière de science du changement climatique. Le PRDE a admis la valeur que présenterait un tel conseiller, et accueilli la proposition de financemenet. Cependant, il a aussi été conscient que les émissions de gaz à effet de serre d'origine énergétique devaient être prises en compte dans le contexte des cycles planétaires naturels du carbone, plus vastes. C'est pourquoi il fallait aussi financer des recherches concernant

la mesure et la compréhension de ces flux naturels de carbone entre l'atmosphère, les terres et les océans. L'appui du PRDE à des projets connexes du Service canadien des forêts (SCF) de RNCan, d'Agriculture et Agroalimentaire (AAC), d'Environnement Canada (EC) et de Pêches et Océans Canada (MPO) a commencé quelques années plus tard – au milieu des années 1980.

Lorsque le Protocole de Kyoto a été signé en 1997, il est devenu clair que la capacité de mettre en place des activités destinées à améliorer les puits biologiques de gaz à effet de serre et de les réclamer au titre des compensations des émissions de gaz d'autres sources dans les déclarations nationales des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ne serait acceptable qu'à condition que le processus de déclaration soit clair et transparent. Face à ce nouveau défi, le BRDE a consolidé son financement des recherches sur le cycle du carbone en un programme intégré axé sur les résultats, destiné à améliorer notre capacité de faire une déclaration exacte des sources et puits anthropiques de gaz à effet de serre touchant les écosystèmes canadiens, et de conseiller les décideurs quant aux mesures permettant d'améliorer les puits de GES. Une équipe interministérielle de conseillers scientifiques a été mise sur pied pour mener cette activité (dite dans le milieu du PRDE niveau d'objectif de programme, ou PON 6.2.1, pour l'amélioration des puits de gaz à effet de serre, soit PON APGES). Le programme a été reconnu comme un modèle de collaboration et d'intégration des recherches entre ministères et disciplines scientifiques.

Je suis heureuse de faire savoir que le programme a été très fructueux. Les résultats de ces recherches ont aidé à faire du Canada un leader dans l'élaboration de protocoles en vue d'une déclaration vérifiable des sources et puits de gaz à effet de serre. Cette même expertise a aussi aidé les dirigeants canadiens à aborder les délibérations sur le sujet tenues sous les auspices de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques en disposant de connaissances solides.

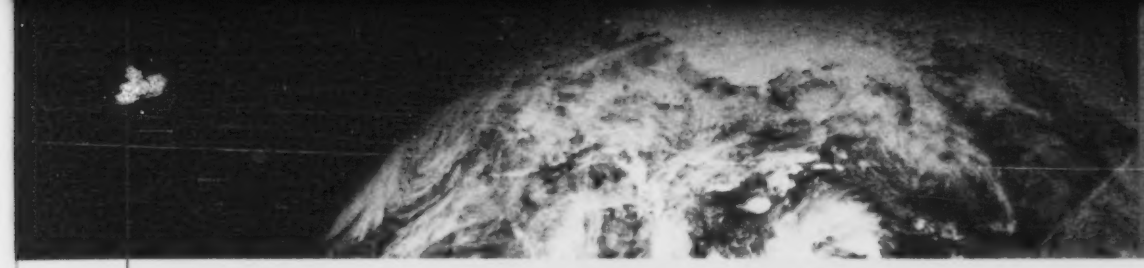
Je tiens à remercier ici de leur dévouement l'équipe de leadership du PON APGES et les nombreux scientifiques d'AAC, d'EC, de MPO et RNCan qui ont participé aux recherches. Leurs efforts ont été essentiels pour atteindre ces résultats.

Le Programme de recherche et de développement énergétiques a décidé de mettre fin à son financement de recherches sur les puits de gaz à effet de serre à la fin de l'année financière 2006-2007. Mais ce n'était pas parce qu'il jugeait que ces recherches n'étaient plus importantes. En fait, il voulait consacrer les maigres ressources à des activités de R&D sur des technologies énergétiques de haute priorité. En bref, d'autres domaines de recherche et de technologie avaient grand besoin des ressources limitées dont dispose le programme.

C'est donc un bon moment pour faire un bilan et examiner quelles sont les futures priorités de recherche sur les sources et puits de gaz à effet de serre au Canada et à proximité, qui devrait financer ces recherches et comment elles devraient être organisées. Pour ce faire, nous devons d'abord évaluer où nous somme arrivés.

C'est là la raison d'être du présent rapport.

GRAHAM CAMPBELL
Director General
Directeur général
Bureau de la recherche et du développement énergétiques



CHAPITRE 1

Aperçu des connaissances scientifiques et des objectifs des activités canadiennes de recherches pertinentes pour l'amélioration des puits de gaz à effet de serre au Canada

Auteur coordonnateur et principal | **H. Hengeveld**

1.1 Introduction

La circulation constante du carbone et de ses divers composés entre les écosystèmes terrestres, les océans et l'atmosphère joue un rôle fondamental dans les processus écologiques à l'échelle mondiale. Les plantes captent le carbone de l'atmosphère par photosynthèse et le retournent dans l'atmosphère par respiration et combustion. Le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique est aussi directement absorbé par la surface des océans, où il passe par le cycle des chaînes alimentaires de l'océan. Les océans retournent presque autant de CO_2 dans l'atmosphère par les processus de dégazage. Le carbone est aussi transporté sous forme de composés inorganiques ou organiques au sein des écosystèmes, entre les écosystèmes, les systèmes dulcicoles et les océans ainsi qu'entre la surface et les profondeurs des océans.

Ces flux de carbone entre la terre, l'océan et l'atmosphère agissent également comme d'importantes rétroactions au sein du système climatique mondial, sur des échelles de temps allant des années aux millénaires et davantage. Par conséquent, la compréhension du système naturel du carbone et de sa réaction aux influences externes constitue un aspect essentiel de l'amélioration des prédictions relatives au climat.

Il est maintenant évident que les activités humaines ont une incidence sur ces processus et rétroactions naturels, tant par l'utilisation des terres et le changement d'utilisation des terres que par les émissions directes de CO_2 dans l'atmosphère dues à la combustion de combustibles fossiles à base de carbone. Il est donc important de comprendre comment la gestion des écosystèmes peut aider à réduire le rejet de gaz à effet de serre (GES) par ceux-ci ou à améliorer les puits écologiques, afin d'élaborer et mettre en œuvre des options stratégiques visant à réduire les risques pour les écosystèmes et la société humaine découlant de changements climatiques rapides.

Le cycle de l'azote est intimement lié à celui du carbone. Il influe sur l'approvisionnement en nutriants pour la croissance biologique et sur la production et l'absorption de l'oxyde de diazote (N_2O) atmosphérique, un important GES.

Le présent chapitre d'introduction fournit un aperçu de l'état actuel des connaissances relatives à ces cycles, en fonction de leur comportement naturel pendant la période préindustrielle et des changements qui sont survenus, et qui surviendront, en raison des activités anthropiques. Il présente également les connaissances scientifiques appuyant l'inclusion des puits de carbone dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et dans son Protocole de Kyoto ainsi que les

défis relatifs aux rapports sur les sources et les puits de GES associés à l'utilisation humaine des terres et au changement d'affectation des terres de manière transparente et vérifiable.

1.2 Le cycle mondial du carbone

1.2.1 Les réservoirs mondiaux préindustriels de carbone et leurs flux annuels

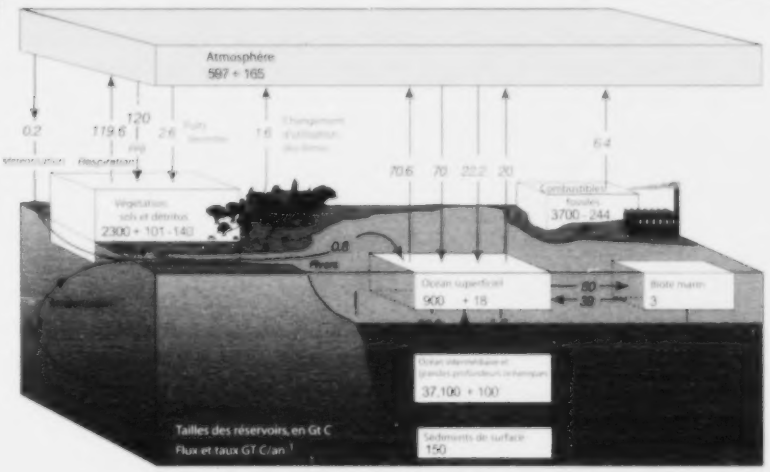
De très vastes réservoirs de carbone ont été emprisonnés dans la roche sédimentaire et les dépôts fossiles au fil de millions d'années. Comme les changements naturels dans ces réservoirs surviennent normalement très lentement, ils ne constituent pas des facteurs importants de changement des flux de carbone à des échelles séculaires ou plus courtes. Le rejet catastrophique de méthane emprisonné dans les hydrates gelés sous le plancher de l'océan constituerait une exception. Selon certaines indications, ces poches peuvent abruptement libérer de grandes quantités de méthane pendant les périodes de changements climatiques et contribuer de façon importante à l'évolution des concentrations atmosphériques de méthane dans les siècles à venir.

Par ailleurs, les océans, les sédiments des lacs, les sols terrestres ainsi que la litière et la biomasse aérienne contribuent tous au cycle actif du carbone qui est en état constant de circulation à des échelles de temps allant des jours aux siècles (Denman, 2007). Leurs rôles sont les suivants (*se reporter à la figure 1.1*) :

- ***Océans :*** Les océans représentent le plus vaste réservoir de carbone du cycle actif du carbone. Dans leur état préindustriel, les océans intermédiaires et profonds, incluant les sédiments sur le plancher océanique, contenaient quelque 39 milliards de tonnes métriques de carbone (Gt C), majoritairement sous forme inorganique. Les 100 premiers mètres sous la surface de l'océan, où se trouve la majeure partie du biote, en contenaient environ 900 Gt C de plus. Comme les eaux des grandes profondeurs océaniques remontent vers la surface sur une échelle plus longue (~1000 ans), la majeure partie du carbone du fond des océans y reste séquestré pendant des siècles. Pour leur part, les eaux de surface de l'océan des environnements préindustriels ont échangé annuellement en moyenne 70 Gt C avec l'atmosphère.
- ***Écosystèmes terrestres :*** Le contenu total de carbone des écosystèmes terrestres globaux, y compris les zones humides et les plans d'eau, est beaucoup moins élevé que celui des océans. Les estimations pour le milieu du 18e siècle (considéré comme la fin de la période préindustrielle) suggèrent un réservoir total de quelque 2300 Gt C, dont 80 p. 100 dans les sols et la litière de surface, et le reste dans la végétation aérienne. Toutefois, la production primaire nette a séquestré environ 60 Gt C/an dans les écosystèmes terrestres par photosynthèse, alors que la respiration et la décomposition/combustion de la biomasse en ont retourné annuellement environ la même quantité dans l'atmosphère.

FIGURE 1.1

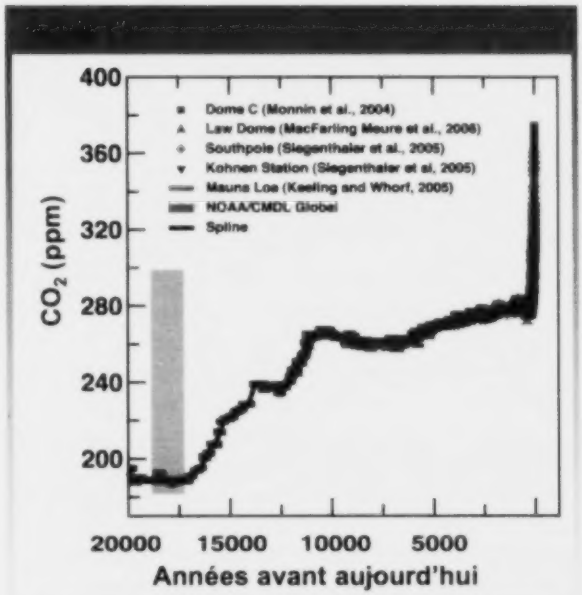
Le cycle mondial du carbone pour les années 1990, illustrant les principaux flux annuels, en Gt C an^{-1} : les flux « naturels » préindustriels sont présentés en noir et les flux « anthropiques » en rouge.



- ***L'atmosphère :*** Dans l'atmosphère, le carbone se trouve principalement sous la forme de CO_2 (avec des quantités beaucoup plus petites de méthane, de monoxyde de carbone et de particules solides de carbone.) D'après les données des carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique, les concentrations préindustrielles de CO_2 étaient d'environ 280 parties par million (ppm), soit l'équivalent d'un réservoir de carbone de près de 600 Gt C. Étant donné le flux annuel net de 130 Gt C entre l'atmosphère et les autres réservoirs de carbone, le renouvellement du carbone dans l'atmosphère est relativement rapide, soit environ tous les quatre à cinq ans.

Les reconstitutions de la composition passée de l'atmosphère et des climats tirées des carottes de glace de l'Antarctique indiquent que les concentrations atmosphériques de CO_2 ont varié de minimums d'environ 200 ppm pendant les périodes glaciaires à des maximums de 280 ppm pendant les périodes interglaciaires. Il existe un lien très étroit entre les changements de ces concentrations et les températures en Antarctique. Bien que les spécialistes avancent que les fortes oscillations du climat entre les époques glaciaires et interglaciaires ont probablement été provoquées par des changements de l'orbite de la Terre à cette époque (qui influent sur l'ampleur et la distribution de l'insolation), les changements initiaux du climat semblent avoir provoqué d'importants changements des flux de CO_2 entre l'atmosphère et les autres réservoirs de carbone (principalement les océans) qui ont modifié les concentrations atmosphériques de CO_2 et donc l'intensité du forçage dû aux GES. Les études suggèrent que cette importante rétroaction aurait contribué pour près de 50 p. 100 à l'amplitude des cycles glaciaires.

Le climat de la Terre est en mode interglaciaire (appelé l'Holocène) depuis 10 000 ans. Pendant cette période, les concentrations atmosphériques de CO_2 ont varié sur une plage étroite, de 260 à 280 ppm. Comme les changements des concentrations atmosphériques de CO_2 sont une mesure de l'échange net de carbone entre l'atmosphère et les autres réservoirs (comme le solde d'un compte bancaire indique la différence nette entre les dépôts et les retraits), ces données suggèrent que, malgré leur importance, le solde annuel net des flux entrant et sortant (moyenné sur le temps) a été proche de zéro pendant la majeure partie de l'Holocène, jusqu'à il y a 200 ans (*figure 1.2*).

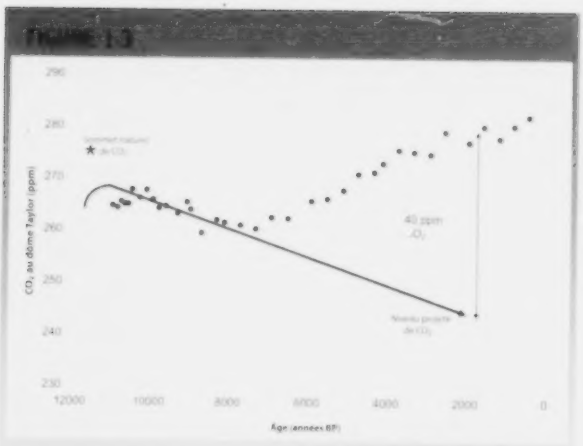


Les tendances des concentrations de CO_2 atmosphériques pendant l'Holocène suggèrent que le cycle préindustriel naturel du carbone était, en moyenne, bien équilibré.

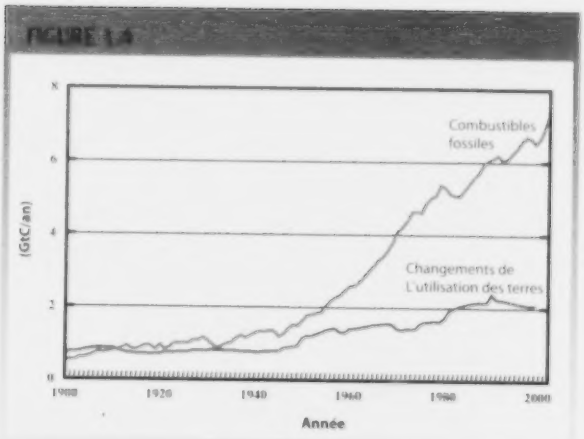
1.2.2 Influence de l'humain sur le bilan mondial du carbone

Diverses études suggèrent que l'interférence de l'homme dans le cycle mondial du carbone a commencé avec le début des établissements humains basés sur l'agriculture en Asie, au début de l'Holocène (voir le chapitre 2). Bien que très faible sur une base annuelle, ce léger déséquilibre du flux net de carbone entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère s'est lentement accumulé pour causer une légère hausse des concentrations atmosphériques de CO_2 (*figure 1.3*). Les changements de l'utilisation des terres sont restés la principale source d'émissions anthropiques de CO_2 dans l'atmosphère jusque vers 1900.

Toutefois, l'expansion rapide de l'industrialisation dans le monde occidental et le développement du moteur à combustion interne qui l'a accompagnée ont introduit une importante nouvelle source d'émissions de CO_2 résultant de la combustion du charbon, du mazout et du gaz naturel, éléments provenant tous de réservoirs fossiles et retirés depuis longtemps du cycle naturel actif mondial du carbone. Vers 1910, les émissions dues à la combustion de combustibles fossiles avaient dépassé celles attribuables au changement d'utilisation des terres. C'est en 1957 que des



Concentrations de CO_2 reconstituées à partir des données des carottes de glace de l'Antarctique, comparées à la tendance de CO_2 pendant l'Holocène projetée vers des valeurs atteintes pendant les interglaciations antérieures. Le point de départ du CO_2 de la carotte de glace par rapport à la tendance projetée pour environ 8 000 BP peut marquer le début des influences dues au changement d'utilisation des terres par l'homme (Ruddiman, 2003).

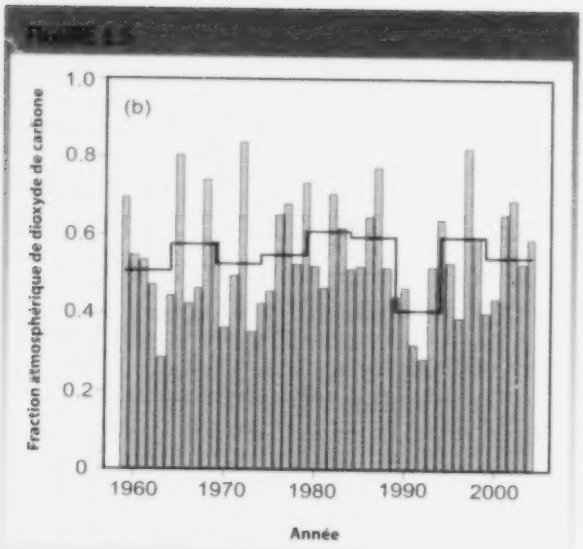


Les émissions humaines de CO_2 dans l'atmosphère ont progressivement augmenté au fil du temps. Les émissions attribuables à la combustion de combustibles fossiles ont plus que triplé au cours des 50 dernières années.

scientifiques ont pour la première fois exprimé des inquiétudes relativement au rythme de la hausse du CO_2 dans l'atmosphère et à son incidence possible sur le climat mondial. À cette époque, les émissions de combustibles fossiles avaient atteint 2,3 milliards de tonnes métriques de carbone par an, et les concentrations dans l'atmosphère 315 ppm, dépassant déjà ce que nous connaissons maintenant comme les niveaux les plus élevés détectables dans les carottes de glace couvrant les 650 000 dernières années. Elles n'ont pas cessé d'augmenter depuis. Entre-temps, les émissions causées par le déboisement des régions tropicales et d'autres changements de l'utilisation des terres ont augmenté à un rythme plus modéré (*voir la figure 1.4*). Selon les derniers rapports, les émissions moyennes de ces sources combinées, entre 2000 et 2005, avaient atteint environ 8,6 Gt C/an et, à la fin de cette période, les concentrations atmosphériques se situaient à 380 ppm.

Un réseau mondial de stations de surveillance de la composition de l'atmosphère indique que la quantité de CO_2 dans l'atmosphère a continué à augmenter en réaction à ces nouveaux ajouts au cycle du carbone, mais à un rythme plus lent que la quantité annuelle libérée dans l'atmosphère par les émissions anthropiques. En fait, pendant la période allant de 2000 à 2005, un peu moins de la moitié du carbone émis est resté dans l'atmosphère pour contribuer à la hausse des concentrations de CO_2. Le reste en a été extrait par les processus de photosynthèse et d'absorption, et stocké dans les écosystèmes terrestres et les réservoirs des océans. La quantité de carbone excédentaire extrait variera considérablement d'une année à l'autre; certaines années, moins de 20 p. 100 est extrait; d'autres, plus de 70 p. 100 l'est (*voir la figure 1.5*). Cette variation est due au fait que les processus d'extraction sont sensibles aux changements et aux variations du climat mondial.

Dans les écosystèmes terrestres, les effets combinés de l'effet positif direct de l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO_2, du réchauffement du climat et de l'accroissement de nutriants azotés dans les écosystèmes ont contribué à faire croître la productivité végétale globale et donc l'absorption annuelle de CO_2 par photosynthèse par rapport au rejet dû à la respiration. Pendant la dernière décennie, ce flux net a été de l'ordre de 2 à 3 Gt C/an. Même après avoir tenu compte des émissions anthropiques dues au changement de l'utilisation des terres (en particulier, le déboisement), il reste un flux net de carbone de l'atmosphère vers la terre d'environ 1 Gt C/an. Des concentrations atmosphériques de CO_2 plus élevées ont également injecté davantage de CO_2 dans les eaux superficielles de l'océan, provoquant chaque année une hausse du flux net vers les océans, des niveaux préindustriels de 70 à quelque 92 Gt C/an.



Tendances de la fraction du dioxyde de carbone émis par la combustion de combustible fossile qui reste dans l'atmosphère. Bien qu'en moyenne environ 50 p. 100 de ces émissions soient extraites par une accentuation de l'absorption nette par les écosystèmes terrestres et les océans, cette quantité varie grandement d'une année à l'autre (Denman, 2007).

Le dégazage annuel des océans dans l'atmosphère a également augmenté, mais plus lentement. Le résultat net est un puits net annuel dans les océans d'environ 2,2 Gt C/an depuis 1990.

1.2.3 Influences de l'humain sur le bilan mondial du méthane

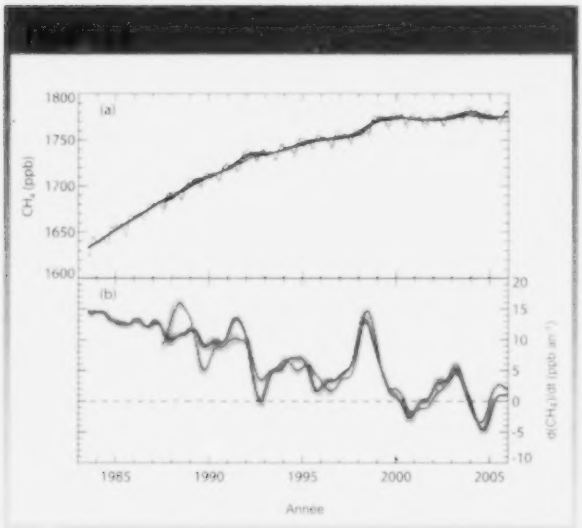
La deuxième forme en abondance de carbone dans l'atmosphère est le méthane. À l'époque préindustrielle, sa concentration atmosphérique a varié d'environ 400 parties par milliard (ppb) pendant les périodes glaciaires à 700 ppb pendant les interglaciaires. Bien que cette source représente moins de 1 p. 100 de celle de CO_2, le méthane est, aux échelles séculaires, un GES 23 fois plus puissant (par unité de masse) que lui. C'est donc un important contributeur secondaire à l'augmentation de l'effet de serre.

La principale source naturelle de méthane atmosphérique est sa production et sa libération par la décomposition de la biomasse en l'absence d'oxygène. Ce processus intervient surtout dans les zones humides qui parsèment les terres de toute la planète ainsi que dans le rejet des gaz produits par les ruminants comme les vaches, les buffles et les moutons. Les sources secondaires de méthane comprennent les océans, les termites et les réservoirs géologiques comme les hydrates gelés. Même si les émissions préindustrielles dues aux activités humaines, notamment la production de cultures céréalières exigeant l'inondation périodique des terres (p. ex., les rizières) et la production animale à grande échelle s'y ajoutaient, environ 80 à 90 p. 100 des émissions totales du milieu du 18e siècle (estimées à environ 200 à 250 Mt CH_4/an) étaient probablement de sources naturelles.

Toutefois, au cours du dernier siècle, le rôle de l'humain dans les flux de méthane a énormément augmenté. En plus de la vaste expansion des sources constituées par les rizières et le bétail, les sources anthropiques biogènes actuelles comprennent le stockage des fumiers animaux, l'inondation à grande échelle d'écosystèmes à des fins de production d'hydroélectricité et les installations de traitement des déchets. Les humains libèrent également des quantités importantes de méthane de sources non biogènes, principalement l'extraction de combustibles fossiles, les centrales au charbon et au gaz naturel, et le brûlage de la biomasse. Aujourd'hui, les émissions totales mondiales de méthane sont estimées à environ 600 Mt CH_4/an, dont plus de 60 p. 100 sont attribuables à des sources humaines (Forster *et al.*, 2007).

Le principal processus d'extraction du méthane de l'atmosphère est la réaction chimique avec le radical hydroxyle OH, un « nettoyant » de l'atmosphère qui en retire aussi de nombreux autres gaz à l'état de traces indésirables. Des réactions chimiques dans les sols terrestres sont un processus secondaire de suppression (environ 20 p. 100). Ces processus sont suffisamment rapides pour ramener la demi-vie du méthane dans l'atmosphère à environ huit ans.

Toutefois, le bilan mondial du méthane est complexe et nombre des processus biologiques restent mal compris. Par exemple, pendant les années 1980, les concentrations atmosphériques de méthane ont augmenté d'environ 10 ppb/an, suggérant un déséquilibre du bilan mondial net d'environ 30 Mt CH_4 par année. Toutefois, pendant les années 1990, elles n'ont pratiquement pas augmenté (*figure 1.6*). Les études donnent à penser que ni les changements dans les émissions humaines ni une augmentation des processus de suppression atmosphérique ne semblent être la principale raison de ce déclin des taux de croissance. Les spécialistes suggèrent plutôt qu'une réaction naturelle des écosystèmes globaux aux variations du climat en serait responsable et que les taux de croissance pourraient revenir à leurs niveaux antérieurs dans un avenir proche.



Les tendances des concentrations de méthane (panneau du haut) indiquent que les niveaux actuels sont plus du double des conditions préindustrielles (~700 ppm). Toutefois, l'augmentation annuelle a diminué considérablement pendant la dernière décennie (panneau du bas) (Forster *et al.* , 2007).

1.3 Cycle mondial de l'azote

La molécule d'azote stable (N_2) est le gaz le plus abondant dans l'atmosphère (79 p. 100). Sous cette forme, l'azote est non réactif et a donc peu d'effets sur le climat ou l'écologie.

Toutefois, le composé atmosphérique le plus stable de l'azote, soit le N_2O, est un très puissant GES. Bien que présent en très faibles concentrations (environ 0,3 ppb), il est, par unité massique d'émission, environ 300 fois plus puissant que le CO_2. Il a donc également été une importante cause secondaire des changements climatiques.

Dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, l'azote (comme le phosphore et le fer) est un important nutriant limitant dans la productivité biologique. Son abondance dans les écosystèmes est donc aussi une variable importante du cycle du carbone. De plus, d'autres N_2O plus réactifs (NO_2, NO et ammoniac) participent au transport atmosphérique de l'azote vers les écosystèmes (ce qui, en quantités modestes, peut accroître la productivité de l'écosystème, mais, en quantités excessives, peut causer des dommages biologiques par acidification du sol) et à la chimie atmosphérique de l'ozone (ce qui influe sur les concentrations d'ozone troposphérique).

Il est donc important de comprendre les flux biologiques et la chimie de l'azote pour comprendre les sources et les puits écologiques de CO_2 et de N_2O.

1.3.1 Bilan mondial de l'oxyde de diazote

Chaque année, les sources naturelles libèrent dans l'atmosphère environ 10 millions de tonnes d'azote sous forme de N_2O. Ces émissions proviennent principalement des sols végétalisés (environ 60 p. 100) et de la surface des océans. La production par des processus chimiques dans l'atmosphère est une petite source secondaire. Toutefois, ce composé étant très stable et ne réagissant pas immédiatement dans la troposphère, il a une vie atmosphérique de l'ordre de 120 ans. Le gaz peut donc s'élever jusque dans la stratosphère, où l'intense rayonnement solaire le décompose. La destruction chimique dans la stratosphère constitue son principal puits.

Au fil du temps, les émissions anthropiques de N_2O ont constitué un important ajout aux sources naturelles. Les experts estiment que les émissions humaines sont maintenant du même ordre de grandeur que les émissions de sources naturelles. Les principales activités humaines qui contribuent à sa libération sont l'utilisation d'engrais dans la production agricole (près de 60 p. 100 des émissions humaines) et la contamination des rivières, des estuaires et des zones côtières (15 à 20 p. 100). Les autres sources anthropiques secondaires comprennent la combustion de la biomasse, l'utilisation de combustibles fossiles, les procédés industriels, l'enfouissement et les déchets humains et le dépôt d'azote atmosphérique sur les écosystèmes. Bien que les concentrations plus élevées de N_2O aient également contribué à en faire croître le flux vers la stratosphère et le taux de destruction, cette hausse n'a pas suivi celle des émissions. Le déséquilibre annuel net a mené à une lente hausse des concentrations atmosphériques avec le temps; les concentrations actuelles sont d'environ 16 p. 100 supérieures à celles de la période préindustrielle.

1.3.2 Émissions mondiales des oxydes d'azote et d'ammoniac

Les émissions annuelles des composés d'azote les plus réactifs ont augmenté de façon encore plus prononcée, les

émissions anthropiques étant maintenant estimées à près du triple de celles des sources naturelles. Les principales sources humaines sont la combustion de combustibles fossiles et le brûlage de la biomasse. La forte augmentation des émissions a beaucoup fait augmenter les concentrations atmosphériques et donc leur dépôt dans les écosystèmes terrestres. Toutefois, comme ces gaz ont une courte durée de vie, leur distribution varie grandement dans l'espace et dans le temps.

Chaque année, les émissions d'ammoniac de sources naturelles injectent un total d'environ 11 Mt de N dans l'atmosphère. Les activités humaines ont ajouté annuellement environ 30 Mt N à ces émissions; les émissions totales s'élèvent donc maintenant à environ quatre fois les niveaux préindustriels. Les principales sources anthropiques d'émissions sont l'utilisation d'engrais pour l'agriculture (environ 80 p. 100) et le brûlage de la biomasse.

Les recherches portant sur le cycle du carbone et sur les sources et puits écologiques de CO_2 doivent prendre en compte les incidences complexes de tels dépôts d'oxydes d'azote (NO_x) et d'ammoniac sur la productivité écologique.

1.4 Le cycle du carbone dans les écosystèmes du Canada et les océans qui le bordent

Bien qu'un réseau mondial de stations de surveillance de la composition de l'atmosphère ait permis d'obtenir une évaluation exacte du flux mondial annuel net du carbone vers l'atmosphère, la distribution régionale des sources et des puits de CO_2 et les processus qui y contribuent sont complexes et beaucoup plus difficiles à estimer. Les régions tropicales où se poursuit le déboisement à grande échelle tendent à être une grande source de carbone atmosphérique, alors que les forêts tempérées d'Europe et d'Amérique du Nord semblent en être de vastes puits. L'ampleur de ces sources et puits à l'échelle régionale peut varier beaucoup d'une année à l'autre, principalement en raison des variations du climat régional. Pendant une année donnée, par exemple, une région comme l'Amazonie peut connaître une grande sécheresse et donc des incendies de forêt qui provoquent d'importantes émissions de carbone, alors que le Canada peut connaître un été chaud et humide qui stimule un captage biologique du carbone de l'atmosphère plus important que la normale. L'année suivante, ces rôles peuvent être inversés. Les études de modèle inverse, où les modèles de transport atmosphérique sont utilisés conjointement avec un réseau de mesures de surface de la concentration de CO_2 atmosphérique, peuvent être utilisées pour estimer les tendances et les comportements de tels flux régionaux de carbone. Ces études suggèrent que les régions tropicales ne constituaient pas une source ou un puits important net de carbone pendant les années 1990, alors que l'Amérique du Nord en a extrait de façon constante environ 200 à 300 millions de tonnes de l'atmosphère chaque année et l'Europe jusqu'au double (Potter *et al.*, 2003).

Le rôle des écosystèmes terrestres et marins, qu'ils soient situés au Canada ou en périphérie, doit être étudié dans ce contexte d'un cycle mondial du carbone qui varie énormément d'une région et d'une année à l'autre. La superficie terrestre totale du Canada est d'environ 9,1 millions de km^2 (6 p. 100 de la superficie terrestre de la Terre), couverte à environ 35 p. 100 de forêts, de 14 p. 100 de zones humides et de 7,5 p. 100 d'exploitations agricoles. Le Canada est également bordé de trois océans, à l'ouest, au nord et à l'est. Particulièrement aux latitudes moyennes, ces océans ont une productivité biologique élevée et contribuent grandement au flux global de CO_2 entre l'atmosphère et l'océan. C'est pourquoi la compréhension du rôle de ces régions écologiques dans l'absorption et la libération des GES dans l'atmosphère aide à mieux comprendre le cycle mondial du carbone et son comportement. De plus, ce sont ces sources et puits naturels d'échelle régionale qui fournissent le contexte pour évaluer le potentiel de réduction des émissions et d'amélioration des puits de GES.

1.4.1 Les terres agricoles du Canada

Comme indiqué dans le rapport de la table sur les puits (Table nationale des puits, 1998), les terres agricoles du Canada représentent environ 68 millions d'hectares. Chaque année, environ 45,5 millions d'hectares de terres (les terres agricoles « améliorées » ou « gérées ») sont cultivées, mises en jachère ou en pâturage bonifié. Les terres naturelles de pâturage (parcours naturel) couvrent environ 15,5 millions d'hectares, et les autres terres (boisés, zones humides, etc.) près de sept millions. La superficie totale de terres agricoles est restée stable depuis les années 1960, mais la superficie cultivée s'est accrue en raison de la conversion de parcours naturels et de la réduction de la jachère.

Des 45,5 millions d'hectares de terres agricoles améliorées, 86 p. 100 (39,1 millions d'hectares) sont situés dans les quatre provinces de l'Ouest. L'Ontario et le Québec en comptent

12,9 p. 100 (5,8 millions d'hectares). En 1990, environ huit millions d'hectares de terre cultivée ont été mis en jachère. Les techniques classiques de culture comprennent le travail du sol préalable aux semences, un apport d'engrais et un épandage, puis le travail du sol après la récolte. Ces pratiques ont permis aux fermiers d'assurer un approvisionnement abondant pour les marchés canadiens et l'exportation au cours des 80 à 200 dernières années.

Le bassin de carbone organique du sol dans les terres cultivées au Canada est évalué à environ six milliards de tonnes jusqu'à une profondeur de un mètre. Historiquement, depuis le début de la culture de ces terres, environ un milliard de tonnes de carbone organique du sol ont été perdues. La majeure partie de cette perte est survenue dans les premières décennies de culture, et a été accentuée par le travail intensif du sol, le brûlage de la biomasse et l'extraction de résidus. Après les premières décennies, le taux de perte a diminué lorsque le carbone organique du sol déjà décomposable a été appauvri, alors que les fermiers ont graduellement adopté de meilleures pratiques de conservation des sols.

Le Canada possède une vaste base de pâturages vivaces totalisant près de 15,5 millions d'hectares en 1990. La majorité des pâturages sont gérés de façon extensive en pâturage saisonnier. Les pâturages surexploités stockent moins de carbone. La sous-utilisation des pâturages réduit aussi la capacité des herbes à maximiser la séquestration du carbone, en raison de la réduction de la période de croissance végétative.

Bien que 15 à 30 p. 100 du carbone présent au départ dans la couche de surface du sol ait été perdu depuis la culture, la majeure partie de cette perte est survenue dans les deux premières décennies de culture. Des simulations à l'aide du modèle Century suggèrent que les émissions annuelles moyennes nettes des terres cultivées au Canada ont chuté de dix millions de tonnes de CO_2 en 1970 à environ sept millions en 1990. Le carbone du sol a donc atteint un nouvel équilibre, notamment en raison de plus petites quantités de terre converties pour la culture, de la réduction des jachères, de l'augmentation de la culture sans travail du sol et de l'augmentation de l'utilisation d'engrais dans les Prairies.

La mesure du carbone dans les sols agricoles a été une activité de routine pendant de nombreuses années, étant donné son importance comme indicateur clé de la qualité du sol. La principale question en matière de piégeage du CO_2 concerne la certitude de la mesure d'une augmentation annuelle relativement faible du carbone qui pourrait être ajoutée par des activités de piégeage. Grâce à un programme d'échantillonnage et d'analyse bien conçu, on pourra s'affranchir de la variabilité entre les champs et au fil du temps, qui peut masquer les petits changements du carbone du sol.

Un second problème concerne la nécessité de trouver une façon de mesurer, de surveiller et de vérifier le changement du carbone des sols qui soit économique et acceptable par la communauté internationale. Cette nécessité est probablement une condition préalable à l'acceptation des puits de carbone du sol comme moyen de réduire ou de compenser les émissions nationales de GES.

Les recherches approfondies qui ont été entreprises pour lever ces lacunes des connaissances, et d'autres, sont examinées en détail au chapitre 2.

1.4.2 Les forêts du Canada

Le rapport sur les puits (Table nationale des puits, 1998) fait remarquer que l'inventaire national des forêts canadiennes comprend 418 millions d'hectares, dont 244,6 millions sont considérés comme propres à la production de bois d'œuvre. Cette superficie représente environ 7,1 p. 100 de la superficie globale de la forêt.

Une analyse de la dynamique du carbone dans la forêt canadienne depuis 1920 suggère que d'importants changements sont survenus au cours des 80 dernières années. De 1920 à 1970 environ, les forêts canadiennes ont connu plusieurs décennies pendant lesquelles les perturbations naturelles étaient relativement faibles par rapport à la période de 1860 à 1920. En conséquence, la structure âge-classe des forêts s'est orientée vers un âge moyen plus élevé. Les forêts plus âgées contiennent davantage de biomasse et de bassins de carbone de matière organique morte, mais leur aptitude à absorber davantage de carbone diminue et leur sensibilité aux incendies et aux perturbations par les insectes augmente. Depuis 1970, toutefois, les perturbations naturelles, notamment les incendies et les insectes, ont grandement augmenté. Des taux de perturbation plus élevés ont réduit les réservoirs de carbone de la biomasse, transférant ainsi une grande partie du carbone résiduel vers les bassins de matière organique morte qui se décomposera et provoquera la libération supplémentaire de carbone. L'effet net des changements observés dans les modes de perturbation naturelle a été une modification du rôle des forêts canadiennes, de vastes puits de carbone à des fluctuations annuelles oscillant entre petite source et petit puits.

Les fluctuations à long terme des régimes naturels de perturbation au Canada ont contribué au rôle changeant des forêts, soit comme puits soit comme source de carbone. Les analyses du rôle futur de ces forêts démontrent qu'elles vont probablement à terme redevenir un puits de carbone et que le moment de survenue de ce changement dépend largement de l'hypothèse posée quant aux taux futurs de perturbation naturelle. De plus, des températures plus élevées et la hausse des concentrations atmosphériques mondiales de CO_2 (communément appelé « effet de fertilisation ») pourraient aussi faire augmenter la productivité nette de l'écosystème et la dynamique du carbone. Les processus de décomposition renforcés dans des climats plus chauds et les effets possibles de la sécheresse sur la productivité ainsi que la perte due aux incendies permettront de compenser ces forces pour améliorer la croissance et l'absorption de carbone. L'effet net de ces forces est le sujet des recherches en cours citées au chapitre 3.

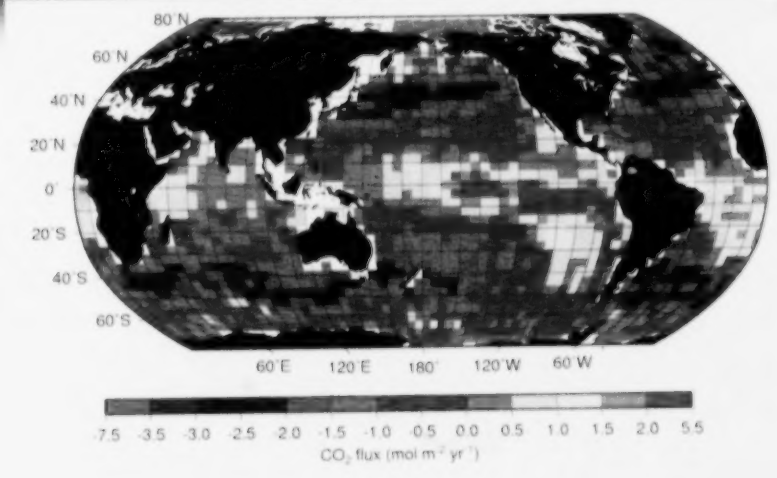
1.4.3 Les zones humides et les tourbières du Canada

Les 148 millions d'hectares de zones humides au Canada représentent 15,9 p. 100 de sa superficie terrestre et plus de 24 p. 100 des zones humides de la planète. Dans le nord du Canada, les zones humides couvrent 81 p. 100 des plaines hudsoniennes, 41 p. 100 des plaines boréales et 38 p. 100 de la taïga des plaines. Dans le sud du Canada, elles couvrent 11,4 p. 100 des Prairies, 5,1 p. 100 du Canada Atlantique et 7,5 p. 100 des plaines de la forêt mixte du sud de l'Ontario et du Québec (Table nationale des puits, 1998). Pour la majorité, les vastes superficies de zones humides du Nord ne sont pas touchées par l'influence humaine directe ou les activités de gestion des terres. Au rang des exceptions figurent les sites d'exploitation hydroélectrique, les mines et les installations de production d'énergie non renouvelable. Les secteurs où la pression d'utilisation des terres est modérée correspondent à des régions ayant un potentiel de développement hydroélectrique à grande échelle.

Les pressions d'utilisation des terres sont le plus élevées dans les paysages exploités du sud du Canada, où la population, l'agriculture et les activités d'exploitation sont les plus fortes. L'état des zones humides dans ces régions est régi par les pratiques d'utilisation de terres qui sont au départ acquises et gérées à d'autres fins. C'est l'expansion agricole qui a eu la plus grande incidence sur les zones humides au Canada. Des études régionales estiment que 65 p. 100 des marais côtiers de l'Atlantique, 68 p. 100 des zones humides du sud de l'Ontario, jusqu'à 70 p. 100 des zones humides des Prairies et 80 p. 100 du delta du Fraser ont été convertis à d'autres utilisations. Les exemples abondent aussi pour les basses terres du Saint-Laurent, la vallée de la rivière Saint-Jean et la vallée d'Annapolis. De plus, 80 à 98 p. 100 des zones humides entourant les principaux centres urbains ont disparu.

Les tourbières naturelles stockent du carbone, libèrent de petites quantités de N_2O et de grandes quantités de méthane. Toutefois, lorsqu'elles sont drainées et converties à d'autres utilisations, de grandes quantités de CO_2 et de N_2O sont libérées, alors que les émissions de méthane diminuent ou cessent. Par exemple, le drainage des tourbières et leur inondation en raison de projets d'hydroélectricité peuvent provoquer d'importants changements de leur rôle comme sources ou puits de GES.

FIGURE 1.7



Estimations du flux annuel moyen mer-air de CO_2, calculées à l'aide de mesures du CO_2 des eaux de surface recueillies depuis 1956. De vastes puits sont visibles dans les régions des latitudes moyennes du Pacifique Nord et de l'Atlantique Nord.

1.4.4 Les océans du Canada

Comme l'illustre la *figure 1.7*, certains des plus importants puits de carbone des océans se trouvent dans les eaux adjacentes au Canada. Les estimations indiquent que les composantes des latitudes moyennes et élevées de l'Atlantique Nord et du Pacifique Nord absorbent à elles seules, chaque année, 1,2 milliard de tonnes de carbone excédentaire de l'atmosphère (Denman, 2007). Le rôle de la mer du Labrador est particulièrement intéressant pour le Canada, puisqu'il s'agit d'une des zones clés où les eaux de surface de l'océan plongent dans les profondeurs, transportant ainsi le CO_2 de source anthropique dans l'océan profond. Le Canada a une importante responsabilité et une longue histoire d'excellence en matière de recherche sur le cycle de carbone dans ces régions.

On réalise de plus en plus l'importance et la complexité des facteurs régissant cette absorption de CO_2 par l'océan et l'exportation subséquente du carbone organique vers l'océan profond. Par exemple, la découverte que le fer est un nutriant limitant pour d'importantes régions des océans du monde a de profondes implications pour comprendre les contrôles de l'absorption du carbone par l'océan ainsi que pour évaluer les options de gestion du carbone. Pourtant, les réactions des flux air-mer de CO_2 et des écosystèmes marins aux variations quotidiennes, saisonnières et interannuelles de l'apport en nutriants et du climat ne sont pas encore bien documentées. De plus, il est nécessaire de pousser l'analyse des flux et de la dynamique du carbone sur les marges continentales ou dans la portion côtière de l'océan, où les interactions sédiment-eau sont importantes et les apports terrestres en perturbations anthropiques sont grands. Le comportement futur du puits de carbone de l'océan est très incertain, en raison de rétroactions potentiellement importantes entre le changement climatique, la circulation océanique, les écosystèmes marins, l'acidification et le cycle océanique du carbone.

À l'échelle internationale, des organismes et des pays se montrent intéressés par la perspective de fertilisation / enrichissement ciblé à grande échelle des océans comme méthode de réduction des GES et comme solution possible pour répondre à leurs obligations en vertu du Protocole de Kyoto, même si les ententes actuelles ne permettent pas d'accorder des crédits de carbone pour l'élimination en mer. Par conséquent, le Canada doit être « armé » de solides informations et d'expertises scientifiques pour mener avec les autres nations un débat efficace sur les propositions de séquestration océanique du CO_2.

À la limite, il faudra disposer de modèles physico-biogéochimiques dynamiques évolués pour simuler les processus complexes en jeu. Toutefois, l'élaboration de ces modèles n'est possible que si les processus sont compris et peuvent être adéquatement paramétrisés, et la compréhension de ces processus nécessite une observation de leur comportement.

1.5 L'amélioration des puits de gaz à effet de serre – un objectif du gouvernement canadien

La CCNUCC, dont le Canada est signataire, a pour ultime objectif la « stabilisation des concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (PNUE, 1992). Aux termes du Protocole de Kyoto de la CCNUCC, le Canada s'est engagé à ramener, d'ici 2008-2012, ses émissions de GES à 6 p. 100 sous les niveaux d'émission de 1990. En 1996, 78 p. 100 des émissions de GES au Canada, majoritairement sous la forme de CO_2, étaient attribuables à la production et à l'utilisation de l'énergie. Le Protocole de Kyoto, toutefois, permet également aux pays de démarrer des projets pour stimuler ou améliorer l'absorption ou la rétention de CO_2 atmosphérique par les écosystèmes forestiers (appelés puits de carbone) et ouvre la porte à d'éventuelles négociations concernant des puits similaires dans d'autres réservoirs de carbone. Ces puits supplémentaires peuvent comprendre l'absorption de carbone dans les sols agricoles, les zones humides et la séquestration biologique du carbone dans les océans. Le carbone piégé grâce aux mesures prises aux termes du Protocole de Kyoto et des ententes subséquentes peut alors compenser d'autres émissions de GES et ainsi contribuer aux activités requises pour réaliser les engagements du Canada à l'égard du Protocole de Kyoto. Ce dernier stipule que de tels puits doivent être déclarés de manière transparente et vérifiable.

Toutefois, comme on l'a déjà noté, les cycles naturels du carbone et de l'azote qui régissent le rejet et l'absorption de GES sont complexes et sensibles aux changements de l'environnement, et varient dans le temps et dans l'espace. Comprendre ces cycles et les processus qui les régissent est essentiel pour mesurer de façon vérifiable la quantité de GES qui peut être retirée de l'atmosphère par l'entremise de mesures prises par l'homme, et ainsi être comptabilisée comme une compensation d'émission en vertu de Kyoto. Bien que les communautés internationales et canadiennes de la recherche aient réalisé d'importants progrès pour améliorer la compréhension scientifique de ces cycles à la

fin des années 1990, il a fallu réaliser bien d'autres travaux avant de pouvoir déclarer de manière vérifiable l'absorption GES due à des projets concernant des puits. En 1999, le Bureau de la recherche et du développement énergétiques, à l'aide d'un nouveau cadre de gestion des résultats qui détermine et met en œuvre des activités de recherche et de développement axées sur l'atteinte de buts et objectifs à long terme préétablis, a entrepris une activité de recherche sur le programme au niveau de l'objectif (PNO) 6.2.1 de l'Amélioration des puits de gaz à effet de serre (APGES). Le plan PNO APGES qui a été produit pendant l'année suivante et mis en œuvre en 2000 visait à s'appuyer sur les recherches antérieures pertinentes, mais en ciblant les efforts sur des recherches coordonnées orientées spécifiquement sur les aspects de la science relatifs à la déclaration future de puits en vertu du Protocole de Kyoto. Au rang des partenaires de ce PNO, on compte Agriculture et Agroalimentaire Canada, Environnement Canada, Pêches et Océans Canada et Ressources naturelles Canada. La recherche viendrait compléter les recherches connexes entreprises sur le cycle des GES déjà menées par les laboratoires gouvernementaux de ces ministères et par la communauté universitaire. Il a également été reconnu qu'étant donné qu'une bonne partie des recherches menées dans le cadre des activités actuelles de recherche visait à mieux comprendre les flux de GES en tant que rétroactions à l'intérieur du système climatique, certains des projets du PNO, bien qu'orientés sur la recherche sur les puits, seraient menés en collaboration avec la communauté plus vaste de la recherche sur les changements climatiques.

L'intention et l'objectif des activités PNO APGES, tels que précisés par le PRDE, étaient les suivants :

- Intention stratégique n° 6 - Minimiser les incidences négatives des changements climatiques sur le secteur de l'énergie.
- Orientation stratégique n° 2 - Fournir les connaissances scientifiques et technologiques pour améliorer l'extraction de GES de l'atmosphère.
- Objectif n° 1 – Réunir une meilleure compréhension des cycles de GES pertinents et définir les étapes permettant d'améliorer l'absorption et la séquestration nettes de GES de l'atmosphère par les écosystèmes forestiers, les paysages agricoles et les océans.

Le personnel du Bureau de la recherche et du développement énergétiques (BRDE) a également indiqué qu'en plus de la principale cible décrite dans l'objectif précédent, certaines ressources du PNO APGES devraient être consacrées aux incidences de l'inondation de la biomasse à des fins de production hydroélectrique sur les émissions de GES.

L'objectif du PNO attribué avait reçu un appui important dans les documents intitulés *Option Paper on Land-Use, Land Use Change and Forestry in Canada* et *Kyoto Protocol* présentés en septembre 1999 au Secrétariat national du changement climatique par la Table sur les puits rassemblée dans le cadre du Processus national sur le changement climatique (Table nationale sur les puits, 1999). Ce rapport comprenait plusieurs recommandations spécifiques concernant les recherches requises pour aider les négociateurs canadiens participant aux discussions internationales sur les puits de carbone et fournir la base de déclarations crédibles sur ces puits. La Table concluait que les « puits forestiers et agricoles devraient jouer un rôle dans une stratégie nationale de mise en œuvre... Il faut dès maintenant investir beaucoup dans les recherches et l'information, pour que le Canada puisse présenter des estimations exactes et vérifiables du changement des stocks de carbone quand cela lui sera demandé et puisse fournir une orientation à ses négociateurs. » La Table a également déterminé que les sols agricoles canadiens avaient un fort potentiel pour la séquestration du carbone pendant la première période de déclaration du Protocole de Kyoto, soit 2008-2012, alors que les forêts présentaient un potentiel plus important, mais à long terme. La Table présentait des recommandations spécifiques pertinentes pour l'objectif attribué d'APGES, notamment :

- Recommandation 2.1 - « que les ministères concernés encouragent leurs scientifiques et experts techniques à entreprendre les priorités de recherche identifiées, en étroite collaboration avec des homologues étrangers, et à utiliser adéquatement l'expertise dans les futures négociations liées aux puits de carbone dans le cadre du Protocole de Kyoto. »
- Recommandation 3.12 - « que l'on détermine l'effet potentiel des changements climatiques à venir sur les prédictions de séquestration de carbone par le biais des activités proposées dans les recommandations 3.1 à 3.5. »
- Recommandation 4.2 - « que l'on prenne en compte le lien entre la restauration des milieux humides et les stratégies d'adoption des pratiques de conservation sur les terres labourables, de gestion des pâturages, de

conversion des terres labourables marginales en prairies de graminées vivaces. »

- Recommandation 4.6 - « que soient effectuées des recherches sur les émissions d'oxydes d'azote et de méthane liées aux quatre stratégies ci-dessus [voir les recommandations 4.2 à 4.5]. Déterminer si les effets des cinq stratégies sur tous les GES entraînent d'autres réductions des émissions ou une plus faible séquestration nette du carbone. Inclure les effets de la consommation de combustibles et de la gestion des substances nutritives. »

- Recommandation 6.1 - « que l'on continue de considérer les milieux humides comme un puits potentiel dans le cadre du Protocole de Kyoto, particulièrement par le biais de l'organisation et de la coordination des sciences et des politiques propres à ces puits. »

- Recommandation 6.2 - « que l'on identifie un pivot de la recherche connexe au Canada afin de bien évaluer, par le biais d'ateliers thématisés, l'état actuel des connaissances et les priorités de la recherche en matière de gestion des milieux humides comme puits potentiels de carbone. Une façon d'atteindre cet objectif serait de créer un nœud de recherches sur les milieux humides dans le cadre du programme BIOCAP des universités canadiennes. »

De plus, dans son rapport sur les options présenté au Secrétariat national du changement climatique, la Table des sciences, des impacts et de l'adaptation a également abordé en profondeur la question de la recherche sur les puits (Table nationale des sciences, des impacts et de l'adaptation, 1999). Par exemple, au chapitre 3, page 9, le rapport fait état de deux préoccupations scientifiques majeures :

- Il existe d'importantes incertitudes scientifiques sur la façon dont le carbone est stocké dans les forêts, le sol et les écosystèmes des zones humides, sur la façon dont le carbone s'accumule et est retenu dans ces puits, et la façon dont les mesures adoptées pour piéger le carbone peuvent avoir une incidence sur les émissions d'autres GES. Il existe d'autres incertitudes tout aussi importantes relatives aux sources de GES provenant des écosystèmes agricoles et d'autres écosystèmes gérés.

- Les changements de température et des ressources hydriques dans les climats plus chauds peuvent avoir des incidences importantes sur l'efficacité à long terme de certaines des mesures d'atténuation vues comme des options pour respecter l'engagement de Kyoto.

Dans la discussion subséquente présentée dans le rapport, la Table ajoutait que, tel que noté dans la Table sur les puits de GES, la Table du secteur forestier et le rapport sur les options d'Agriculture et d'Agroalimentaire, la superficie des écosystèmes canadiens touchée par les activités humaines, (et donc à évaluer pour ses contributions aux sources et aux puits de GES aux termes du Protocole de Kyoto et des ententes subséquentes), peut être estimée avec une exactitude raisonnable, dans la mesure où des inventaires améliorés de l'utilisation des terres et des systèmes de surveillance du changement de l'utilisation des terres plus précis seront élaborés. Toutefois, l'ampleur et la durabilité du puits de carbone (la quantité nette de CO_2 retiré de l'atmosphère et stocké sous la forme de carbone) par hectare de terre sont des éléments beaucoup plus difficiles à établir, en particulier si les conditions climatiques et d'autres facteurs environnementaux changent de façon importante. De plus, les changements d'utilisation des terres ont aussi des incidences mal comprises quant aux émissions ou absorptions de GES, comme le N_2O ou le méthane. Ces incertitudes présentent donc d'importants obstacles à la production de rapports crédibles et vérifiables de puits de carbone durables et d'autres flux de GES issus des mesures de séquestration du carbone. Les principaux problèmes sont les suivants :

- Le piégeage du carbone dans un écosystème en particulier, comme une forêt ou un champ, peut avoir des incidences sur des systèmes adjacents comme des zones humides, des tourbières ou des systèmes côtiers. Par exemple, les tourbières du Canada, qui contiennent environ 10 fois plus de carbone par unité de surface que la biomasse de la forêt et les sols agricoles combinés, se retrouvent principalement dans les forêts boréales. Donc, toute mesure pour y piéger le carbone par boisement devrait prendre en compte les conséquences de la production de méthane et de N_2O dans les tourbières. Comme les processus connexes en jeu sont mal compris, les effets secondaires des mesures de piégeage seront difficiles à évaluer.

- Il y a très peu d'information sur la façon dont ces changements environnementaux (p. ex., les changements climatiques et les augmentations des concentrations de CO_2 et de composés azotes dans

l'atmosphère) modifieront les processus de flux de carbone à l'intérieur des écosystèmes, c'est pourquoi l'estimation du piégeage du carbone aux termes du Protocole de Kyoto est d'autant plus difficile.

- Il faudra disposer de modèles complexes des écosystèmes pour décrire avec exactitude ces processus et relations de façon intégrée et dynamique. Bien que divers modèles aient été conçus au Canada et aient obtenu une importante reconnaissance internationale comme d'excellents outils pour l'étude de la dynamique du carbone au sein des écosystèmes respectifs, ils n'ont pas été conçus pour des applications autres que l'évaluation du potentiel de piégeage de carbone attribuable à la gestion humaine. Ils restent inadéquats pour simuler le comportement de certaines composantes du carbone dans les sols, en particulier celles associées à la respiration. Ces modèles doivent être développés davantage, validés à la lumière des observations et testés par la communauté internationale de la science du système climatique.

- Le piégeage du carbone dans les océans, soit par immersion directe du CO_2 dans les profondeurs océaniques, soit par retrait au moyen d'une augmentation de production biologique induite par la fertilisation au fer des eaux de surface des océans présentant un déficit de nutriants, fait l'objet d'études dans certains pays, comme approche de rechange pour réduire la croissance des concentrations de CO_2 atmosphérique. De nombreuses questions d'ordre technique et environnemental subsistent quant à la viabilité ou à l'acceptabilité de telles mesures. Il est donc peu probable qu'elles seront prises en compte dans les stratégies nationales d'atténuation aux termes du Protocole de Kyoto dans un avenir rapproché. Toutefois, les négociateurs canadiens doivent être au courant de ce potentiel, de l'état de la science du système climatique et des avantages ou des dangers de ces puits, au cas où ils seraient présentés par d'autres pays. L'immense ampleur potentielle de ces puits et la possibilité de dommages à long terme et irréversibles sur l'écosystème causés par des techniques, notamment la fertilisation au fer, peuvent donner à ces recherches une importance cruciale à long terme.

- Certains complexes hydroélectriques peuvent aussi causer l'inondation de grandes quantités de végétaux dans les réservoirs. Des études ont conclu que de ces inondations peuvent provoquer le rejet de grands volumes de méthane dans l'atmosphère. Comme le méthane, en tant que GES, est beaucoup plus puissant par unité de volume que le CO_2, cette situation peut annuler certains des gains obtenus en réduisant les émissions de GES grâce au déplacement de centrales à combustibles fossiles. Toutefois, comme pour les zones humides, les processus qui régissent la production et le rejet de méthane des réservoirs hydroélectriques restent mal compris et doivent être mieux étudiés.

La Table poursuit en recommandant que le Canada mette en œuvre un programme pour étudier les processus de sources et de puits de GES, particulièrement ceux des forêts, des sols agricoles et des océans (page 44).

En janvier 1999, à la demande du comité technique sur les sciences et l'adaptation du Fonds d'action pour le changement climatique, un groupe d'experts scientifiques canadiens sur les processus terrestres de flux de GES (des organismes gouvernementaux et des universités) a organisé une rencontre afin d'étudier les priorités de recherche sur le piégeage terrestre du carbone en vue d'atteindre les recommandations des Tables pertinentes du Secrétariat national du changement climatique. Cette rencontre a permis d'établir des recommandations beaucoup plus détaillées quant aux activités de recherche nécessaires pour respecter les besoins du Canada relativement à Kyoto. Divers membres du comité PNO APGES, ou leurs représentants, y ont participé. Les conclusions de cette rencontre ont été publiées dans un rapport spécial (Hengeveld et Beaulieu, 1999).

Pendant la 5e rencontre technique sur les sources et les puits de GES et les aérosols (Hengeveld et Meyer, 1998), les membres d'un groupe spécial d'experts sur les puits ont pour leur part convenu que l'ampleur du piégeage potentiel du carbone dans les forêts (par l'entremise des activités connexes à Kyoto ou l'amélioration de la sylviculture), les sols agricoles et les océans (fertilisation aux nutriants) sont similaires, mais que la faisabilité est meilleure pour les sols agricoles que pour les océans.

1.6 Stratégie de recherche sur le programme au niveau de l'objectif 6.2.1 de l'Amélioration des puits de gaz à effet de serre

Étant donné les PNO fournis par le BRDE et les diverses recommandations des groupes de travail sur les priorités de recherche connexes, les activités dans le cadre du PNO

visaient trois domaines de recherche spécifiques, soit identifier et comprendre l'incidence humaine sur les processus clés des flux de GES dans les écosystèmes forestiers, agricoles et océaniques du Canada, élaborer des modèles qui décrivent les interrelations entre les activités humaines et ces processus et les utiliser pour évaluer la quantité de gaz qui peuvent être extraits de l'atmosphère à l'aide de mesures prises aux termes du Protocole de Kyoto et d'ententes subséquentes. Les activités viseraient quatre sous-objectifs, ainsi qu'une fonction consultative, comme suit :

1.6.1 Puits que constituent les forêts

OBJECTIF : *Mieux comprendre l'incidence des activités humaines sur les processus qui contrôlent le flux de GES, tant au sein des écosystèmes canadiens qu'en provenance et en direction de ces derniers, qu'ils soient gérés ou non gérés, y compris les zones humides et les plans d'eau douce au sein des zones humides; élaborer/évaluer des méthodes de quantification de l'effet net des mesures prises pour améliorer l'absorption de GES par ces écosystèmes; améliorer les estimations des effets des activités humaines sur le stockage et le rejet des GES par les écosystèmes forestiers du Canada; communiquer ces informations aux décideurs politiques comme fondement scientifique de l'élaboration des programmes de séquestration de GES.*

Des études suggèrent que les écosystèmes forestiers du Canada passent de puits à source de CO_2 atmosphérique sur des périodes se chiffrant en années, en décennies et en siècles. Les informations actuelles indiquent que les forêts du Canada ont accumulé du carbone au cours de la plus grande partie du dernier siècle à un taux moyen de 173 Mt C par année. Toutefois, au cours des 30 dernières années environ de cette période, les changements climatiques apparents et les perturbations de la forêt associées aux incendies, aux insectes et à la récolte semblent avoir transformé cet important puits en source nette de CO_2. Bien que les estimations du bilan de carbone de la forêt canadienne se soient améliorées dans la dernière décennie, il reste d'importantes incertitudes quant à l'ampleur et à l'état de la combinaison puits-source de la forêt. Ces éléments comprennent notamment : i) le rôle, passé et actuel, des perturbations associées aux incendies, aux insectes et à notre gestion de la forêt; ii) l'effet de fertilisation de l'augmentation du CO_2 atmosphérique et du dépôt de NO_x provenant de la pollution atmosphérique sur le captage net; iii) la quantité de carbone extraite et stockée dans le sol des forêts et les zones humides; iv) la sensibilité des flux de carbone et du stockage aux variations et aux changements du climat et v) le rôle des produits du bois dans le stockage du carbone.

Ces incertitudes ont nui à la capacité d'évaluer et de vérifier l'ampleur et la durabilité de l'accroissement du piégeage de carbone réalisé grâce à des mesures adoptées dans le cadre du Protocole de Kyoto. Afin de réduire ces incertitudes et de diversifier la gamme d'options possibles de piégeage étudiées dans le cadre du Protocole de Kyoto, il est impératif de poursuivre les recherches. Des rencontres d'experts ont eu lieu récemment pour étudier l'état des recherches sur le cycle du carbone et les incertitudes liées aux approches actuelles d'estimation du cycle du carbone de la forêt; elles ont permis de déterminer un certain nombre d'importantes priorités de recherche qui contribueraient à répondre aux exigences de transparence et de vérifiabilité de Kyoto, tout en poursuivant le développement. Il faudra, entre autres, déterminer les effets :

- des activités de reboisement, de déboisement et de boisement sur l'augmentation du stockage ou du rejet de carbone dans les écosystèmes forestiers gérés;
- des activités de gestion forestière sur le stockage et le rejet du carbone dans les sols forestiers et les détritus du sol forestier, les tourbières et les zones humides;
- de l'élévation du CO_2 et de la pollution atmosphérique (NO_x, SO_x) sur le stockage ou le rejet de carbone atmosphérique dans les écosystèmes forestiers gérés et non gérés;
- des variations et changements du climat sur le captage net du carbone dans les écosystèmes forestiers gérés et non gérés.

Divers projets de recherche, nationaux et internationaux, ont déjà été réalisés pour lever ces incertitudes et pour concevoir des outils visant à comprendre les processus internes du cycle du carbone dans la forêt. Les projets prévus dans le cadre du PNO APGES viseraient à étudier plus en détail les effets des activités humaines sur les processus des GES dans les écosystèmes forestiers et leurs incidences sur la réaction des écosystèmes forestiers canadiens, y compris les zones humides et les plans d'eau

qui s'y trouvent, dans l'optique de contribuer aux engagements du Canada aux termes du Protocole de Kyoto et de les élargir. Les résultats seraient utilisés pour mettre en œuvre les améliorations voulues des modèles de cycle du carbone forestier nécessaires pour mieux évaluer les incidences des activités humaines sur l'amélioration et la durabilité des écosystèmes forestiers en tant que puits et réservoirs de carbone atmosphérique. Ces projets pourraient tirer profit des travaux connexes menés dans le cadre de programmes de services votés du gouvernement et financés par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie et d'autres programmes spéciaux, par exemple le Fonds d'action pour le changement climatique.

1.6.2 Puits que constituent les sols agricoles

OBJECTIF : *Mieux comprendre les processus qui régissent le flux de GES, tant au sein des écosystèmes agricoles canadiens qu'en provenance et en direction de ces derniers; élaborer/évaluer des méthodes de quantification précise de l'effet net des mesures prises pour améliorer l'absorption de GES par ces systèmes; améliorer les estimations des incidences des activités humaines sur leur absorption nette de GES, et communiquer ces informations aux décideurs politiques comme fondement scientifique de l'élaboration des programmes de séquestration de GES.*

Au Canada, la culture des sols agricoles au cours du dernier siècle a provoqué la perte totale d'environ 1 100 Mt de carbone. La majeure partie de ce carbone a été libérée dans l'atmosphère sous la forme de CO_2. Toutefois, on a évalué qu'en raison de l'appauvrissement des réservoirs de carbone du sol et de l'amélioration des pratiques agricoles au cours de la dernière décennie, le taux de rejet de CO_2 dans l'atmosphère a baissé. Ainsi, en 1999, les sols agricoles canadiens ne constituaient ni un grand puits ni une grande source de CO_2. Des études suggèrent qu'un important programme de récupération d'une partie du carbone perdu par les sols agricoles canadiens améliorerait grandement les compensations des émissions dues aux combustibles fossiles dans le cadre du Protocole de Kyoto si les négociateurs acceptaient d'inclure de tels puits aux inventaires nationaux d'émissions. Toutefois, des questions significatives subsistent quant à l'importance relative de diverses pratiques agricoles et à la capacité de mesurer, de vérifier et de maintenir les puits de carbone dans les sols agricoles. Entre autres :

- Quels sont les facteurs contrôlant l'absorption et les émissions de CO_2, CH_4 et N_2O, en provenance et en direction des sols agricoles?
- Est-il possible de mettre en rapport notre compréhension des facteurs régissant les flux de GES et des modèles robustes et fiables?
- Quelle est la capacité des divers types de sol à stocker davantage de carbone?
- Quelle incidence les pratiques agricoles comme le travail réduit du sol, la réduction de la jachère, l'utilisation accrue d'engrais, l'utilisation accrue de cultures fourragères/légumineuses en rotation, etc., ont-elles sur l'absorption nette de GES?
- Quelle incidence les changements climatiques ont-ils sur le succès des mesures visant à augmenter la séquestration du carbone dans les sols agricoles?
- Comment les changements de pratiques de culture visant à accroître les puits de carbone et les méthodes et types d'engrais azotés appliqués affectent-ils les émissions de NO_x?
- Quel est le rôle des zones humides situées à l'intérieur et à proximité du paysage agricole?
- Quelle incidence l'érosion du sol a-t-elle sur le stockage de carbone et les flux nets de GES?

Le niveau actuel de compréhension des processus biogéochimiques des sols agricoles et de leur réaction aux changements de la température et de l'humidité du sol sont d'importants obstacles empêchant de répondre adéquatement à ces questions. De même, il est nécessaire de mieux comprendre la façon dont le carbone stocké dans les sols est réparti entre les résidus de récolte, le carbone organique et le carbone inorganique. De plus, afin d'estimer les effets nets des programmes d'amélioration des puits de carbone de façon vérifiable, il faut apporter des améliorations appropriées aux outils de mesure et de modélisation pour passer des conditions très variables à l'échelle de la parcelle sur laquelle les flux de GES sont souvent mesurés, à des échelles régionales plus vastes. Il faudrait alors améliorer les techniques de mesure de flux,

puis développer et tester des modèles du CO_2 et du N_2O pour les conditions dans tout le Canada. Bien que des programmes internationaux de recherche visant à mieux comprendre le rôle des systèmes agricoles sur les GES s'attaquent à certaines de ces questions, bon nombre des préoccupations relatives au processus étaient propres aux types de sol, aux conditions climatiques et à d'autres facteurs. Afin d'aider les décideurs politiques à voir les sols agricoles comme des puits de carbone au niveau international, il existait d'importants besoins de recherche uniques au Canada. Les recherches proposées concerneraient une combinaison de mesures directes et de modélisation du processus des cycles du carbone et d'azote; elles viendraient aussi compléter un plus vaste programme ministériel de recherche sur les sols.

1.6.3 Puits que constituent les océans

OBJECTIF : *Mieux comprendre les processus qui régissent le flux de GES, tant au sein des systèmes océaniques canadiens qu'en provenance et en direction de ces systèmes en évaluant le potentiel et la vérifiabilité des mesures permettant d'améliorer leur absorption des GES (y compris les risques environnementaux) et communiquer ces informations aux décideurs politiques comme fondement scientifique de discussions internationales, notamment dans les programmes de séquestration de GES dans l'océan.*

Les études théoriques et les expériences préliminaires menées à la fin des années 1990 ont donné à penser que la fertilisation de régions de l'océan présentant un déficit en fer et autres nutriants pourrait améliorer les processus biologiques qui contribuent à l'absorption annuelle par l'océan du CO_2 présent dans l'atmosphère et au dépôt du carbone associé dans l'océan profond pour un stockage à long terme. On pensait que la quantité de carbone ainsi séquestrée dans les systèmes océaniques grâce aux programmes de fertilisation pourrait être très importante, mais certaines préoccupations majeures subsistaient quant à l'acceptabilité environnementale et la stabilité à long terme de ces puits. Il était alors dans les meilleurs intérêts du Canada d'apporter un appui et de contribuer aux expériences internationales étudiant le potentiel de fertilisation de l'océan afin de poursuivre l'effort scientifique entrepris par la communauté scientifique tout en évaluant les incidences possibles sur l'environnement côtier du Canada si les expériences étaient prometteuses et passaient en phase de démonstration.

Il subsistait de nombreuses et importantes lacunes quant à la compréhension des processus des océans à l'égard de tels puits de carbone. Par exemple :

- Les océanographes ne comprenaient pas encore où et comment le CO_2 de source anthropique excédentaire était absorbé par les systèmes océaniques;
- La variation interannuelle du climat avait une incidence claire sur le l'absorption nette de CO_2 par l'océan, mais les processus qui régissent la façon dont elle modifie les cycles du carbone n'étaient pas bien compris. Il était donc impossible de prévoir les incidences de la variabilité du climat sur la quantité de carbone extrait grâce aux programmes de fertilisation ni les incidences environnementales qui pourraient s'en suivre;
- Le rôle des eaux océaniques côtières dans l'absorption du CO_2 de l'atmosphère est peut-être important, mais il n'était pas compris;
- Les programmes de fertilisation de l'océan pourraient aussi modifier le rejet de N_2O par les eaux océaniques affectées. Toutefois, les processus des cycles océaniques de l'azote qui régissent ces émissions et leur sensibilité aux changements environnementaux n'étaient pas compris;
- Les plus importantes conséquences écologiques des expériences de fertilisation de l'océan n'avaient pas été étudiées.

La communauté internationale des chercheurs était activement impliquée dans des recherches qui visaient à réduire graduellement certaines des incertitudes quant au rôle des océans dans les cycles mondiaux des GES. Ces recherches sont particulièrement importantes pour comprendre la façon dont le cycle mondial du carbone réagira aux futures émissions anthropiques de GES à mesure que les océans se réchaufferont et que les concentrations de CO_2 à la surface de l'océan augmenteront. Les scientifiques canadiens, financés par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie et les ressources ministérielles votées par le gouvernement, ont participé activement à ces activités. Des recherches

connexes dans le cadre du PRDE seraient un important complément à ces activités et tireraient avantage des résultats de programmes de recherche plus vastes. Toutefois, dans le cadre du PNO APGES, la recherche ciblerait principalement les questions sur la faisabilité pratique et environnementale d'éventuels programmes d'amélioration de la séquestration du carbone dans les océans adjacents au Canada, que de tels programmes soient mis en œuvre par le Canada ou d'autres pays. Les modèles du cycle du carbone devraient être améliorés comme outils d'évaluation du devenir du carbone séquestré. Les informations connexes pourraient aussi être d'une importance cruciale en cas de négociations sur l'admissibilité de ces programmes comme mesures dans le cadre du Protocole de Kyoto et des instruments politiques subséquents.

1.6.4 Les réservoirs hydroélectriques

OBJECTIF : *Mieux comprendre les processus qui influent sur les flux de GES dans les réservoirs hydroélectriques; élaborer des méthodes permettant de quantifier précisément les changements dans les flux nets à la suite des aménagements hydroélectriques et communiquer ces informations aux décideurs politiques comme fondement scientifique pour l'élaboration d'options de programmes d'atténuation des GES.*

La production hydroélectrique constitue une option de remplacement de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles par des solutions de rechange renouvelables qui produisent beaucoup moins d'émissions de CO_2. Toutefois, diverses études ont démontré que, si ces projets nécessitaient d'inonder de vastes superficies de terres portant des écosystèmes forestiers et des tourbières, ils pourraient causer d'importants changements aux flux de GES (particulièrement le méthane) dans ces réservoirs et en provenance de ces derniers. Les processus qui régissent ces flux sont sensibles à divers facteurs, dont la quantité de carbone dans les écosystèmes inondés, tant au-dessus du sol que dans le sol, et la profondeur d'eau des réservoirs après l'inondation.

Une des composantes du PNO APGES cible donc les incertitudes ci-dessus et contribue à mieux comprendre les incidences sur les flux nets de GES des initiatives de solution de changement de combustible faisant intervenir l'hydroélectricité.

Références

Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong *et al.*, 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor et H.L. Miller (dir.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, N. Y., É.-U.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo *et al.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., *et al.*, (dir.)]. 2007, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, N. Y., É.-U.

Hengeveld, H., et P. Beaulieu (dir.). 1998. *Report of the Carbon Flux Process Experts Meeting*, 18-19 janvier 1999. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto.

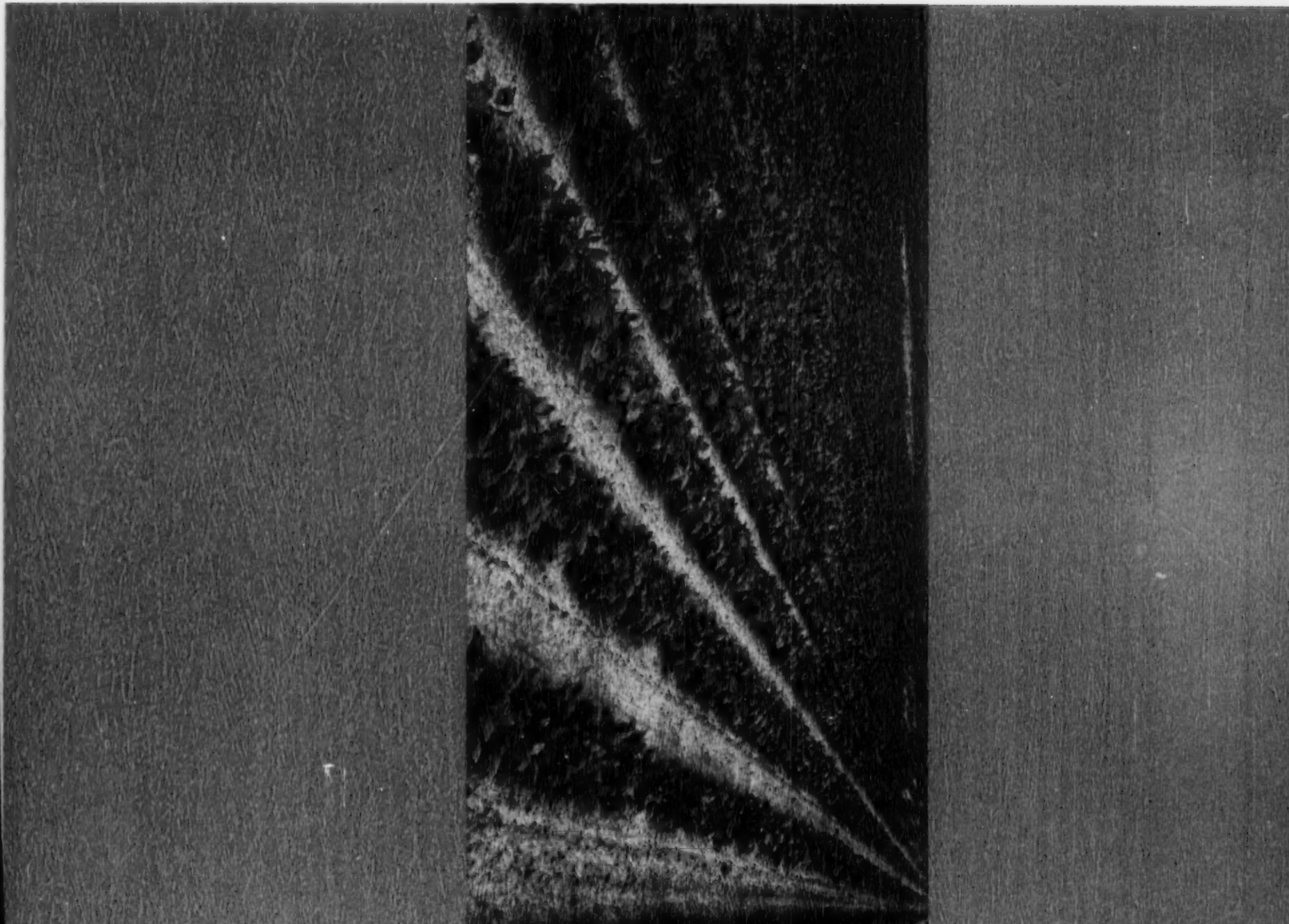
Hengeveld, H., et R. Meyer (dir.). 1998. *Report of the fifth technical meeting on sources and sinks of greenhouse gases and aerosols*, 11-13 mai 1998. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto.

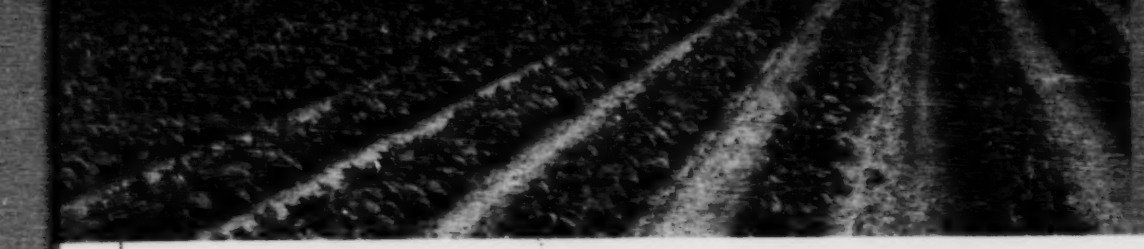
PNUE. 1992. *Convention-cadre sur les changements climatiques*. Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi.

Table nationale sur le puits. 1998. Document de base. Ottawa, novembre 1998.

Table nationale sur les puits. 1999. *Options paper on Land-Use, Land-Use Change and Forestry in Canada and the Kyoto Protocol*. Environnement Canada, Ottawa.

Table nationale sur la science, les impacts et l'adaptation. 1999. *Options paper on Science, Impacts and Adaptation*. Ottawa.





CHAPITRE 2

Comment transformer les terres agricoles canadiennes d'emettrices a puits de ges

Auteur coordonnateur et principal : **R.L. Desjardins**

Contributeurs
H.H. Janzen, P. Rochette, B. McConkey, M. Boehm et D. Worth

2.1 Introduction

L'augmentation, dans l'atmosphère, des gaz à effet de serre (GES) résultant d'activités humaines contribue aux changements climatiques et, à ce titre, est susceptible d'influer sur de nombreux secteurs de l'économie. Cela est particulièrement vrai pour le secteur agricole, puisque le succès de l'agriculture est étroitement lié au climat.

Il est désormais admis que l'agriculture mondiale a contribué de manière notable à l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère. Jusqu'à récemment, les systèmes agricoles primitifs n'étaient considérés que comme une source modeste de GES, leurs répercussions sur les concentrations atmosphériques globales de GES étant, de ce fait, jugées minimes. Des indices récemment découverts contredisent cependant ce courant de pensée (Ruddiman, 2003). En effet, pour la période comprise entre 8 000 et 2 000 ans avant ce jour, on a détecté une augmentation anormale de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO_2), évaluée à 20-25 ppmv. Cette augmentation ne s'explique pas de façon satisfaisante par une perte naturelle de biomasse terrestre, mais semble plutôt liée au défrichage qui a permis l'essor de l'agriculture en Europe et en Chine. De façon similaire, on a observé une augmentation de la concentration atmosphérique de méthane (CH_4) il y a environ 5 000 ans, qui correspond à l'émergence de la « culture humide » du riz en Asie. Ainsi, le point de vue classique selon lequel l'agriculture, avant la révolution industrielle, n'avait eu qu'un impact léger sur l'environnement, n'est pas nécessairement vrai. De petits changements, même dans le contexte d'une population restreinte, peuvent, sur de longues périodes, équivaloir à d'importants bouleversements causés par une population nombreuse dans un court intervalle de temps.

L'explosion planétaire de la population humaine, qui, depuis 1930, a triplé pour atteindre plus de six milliards et qui continuera d'augmenter pendant plusieurs décennies, a d'énormes répercussions sur les activités agricoles. Afin de combler les besoins alimentaires de cette population grandissante, la superficie consacrée aux activités agricoles intensives a considérablement augmenté. À l'échelle mondiale, les terres cultivées sont passées de 265 Mha en 1700 à environ 1 473 Mha aujourd'hui, alors que les terres de pâturage sont passées de 524 à 3 215 Mha. Actuellement, environ 36 % de la superficie totale non glaciaire de la Terre sert à l'agriculture ou au pâturage intensifs (Desjardins *et al.*, 2007a), et il ne reste pratiquement pas de terres inutilisées qui puissent être exploitées pour la culture ou le pâturage, mis à part les zones de forêt tropicale, dont les sols sont très vulnérables à l'érosion et à la perte

d'éléments nutritifs à la suite du défrichage par brûlis (Sommer *et al.*, 2004). L'intensification des activités agricoles se traduit par une augmentation de la fréquence des récoltes et par une utilisation accrue d'engrais, de pesticides et d'herbicides.

Cette augmentation de la superficie servant aux activités agricoles ainsi que l'intensification de celles-ci ont eu de profondes répercussions sur les émissions de GES provenant du secteur agricole. Une part considérable de l'augmentation de 80 ppmv de la concentration atmosphérique du CO_2 depuis la période préindustrielle est attribuable aux émissions provenant du secteur agricole. On estime que, jusque dans les années 1970, les activités agricoles ont rejeté davantage de CO_2 dans l'atmosphère que l'utilisation des combustibles fossiles (Lal *et al.*, 1998). Depuis deux siècles, on estime que les terres agricoles mondiales ont perdu de 40 à 50 Pg de carbone (Pg C) et qu'une quantité additionnelle de 80 à 117 Pg C a été émise par la perte de biomasse liée à l'utilisation agricole des terres (Lal *et al.*, 1998). Le taux actuel d'émission nette de carbone dû à l'agriculture a récemment été évalué à 0,8 Pg C par année, ce qui correspond à 14 % des émissions actuelles provenant des combustibles fossiles (Schlesinger, 1995). Des effets similaires ont été notés pour d'autres GES. Avant la révolution industrielle, au 18e siècle, les émissions annuelles anthropiques de CH_4 et d'oxyde de diazote (N_2O) étaient relativement limitées, soit environ 80 Tg CH_4 (Stern et Kaufmann, 1996) et 1 Tg N_2O-N (Kroeze *et al.*, 1999). Depuis la révolution industrielle, les augmentations massives du cheptel, de l'utilisation d'engrais ainsi que de la superficie des aires cultivées et des pâturages ont causé une augmentation marquée des émissions de CH_4 et N_2O. Les estimations actuelles des émissions globales anthropiques de CH_4 sont d'environ 350 Tg CH_4 annuellement, dont les deux tiers sont attribuables à des sources agricoles, telles que la fermentation entérique chez les ruminants, la culture du riz et les systèmes de gestion du fumier (IPCC, 2001). Les émissions globales anthropogéniques actuelles de N_2O se chiffrent à environ 7 Tg N_2O-N, dont près de 70 % sont d'origine agricole; les émissions provenant des terres agricoles représentent presque 90 % des émissions d'origine agricole (GEIC, 2001).

Comme nous allons le montrer plus loin, l'émergence d'une vaste gamme de technologies modernes et de pratiques améliorées depuis quelques décennies a contribué à faire diminuer le rôle du secteur agricole comme source de GES. Ce secteur demeure toutefois un important contributeur à l'accumulation des GES dans l'atmosphère.

L'agriculture canadienne, qui exploite la 15e plus grande superficie de terres agricoles au monde, a contribué (et continue à le faire) aux changements climatiques par des émissions de gaz à effet de serre et la modification de la couverture du sol. Le défrichage des terres pour l'agriculture a rejeté environ 4 000 Mt de CO_2 dans l'atmosphère (Smith *et al.*, 2000). Les arguments présentés dans la section qui suit montreront par contre que, même si l'agriculture canadienne continue à émettre des quantités importantes de CH_4 et de N_2O, les terres agricoles canadiennes sont actuellement presque neutres, du point de vue du carbone, et ont le potentiel de récupérer une proportion importante du carbone qu'elles ont perdu (Boehm *et al.*, 2004). Nous présentons, dans le présent document, un large éventail d'options pour réduire les émissions de GES et accroître les puits de carbone dans les terres agricoles et nous aborderons les possibilités de réduction des émissions de GES par unité de production.

Nous décrirons brièvement une série de projets qui sont en place au Canada afin de mesurer les changements relatifs au carbone dans les sols ainsi que les émissions de GES. Nous passerons ensuite en revue les progrès récents dans la compréhension des processus liés aux émissions de GES et à l'absorption de carbone par les terres agricoles canadiennes. Nous proposerons enfin plusieurs objectifs généraux pour des recherches connexes, dont une meilleure compréhension des processus fondamentaux et la prévision des changements futurs qui attendent la communauté agricole.

2.2 Émissions passées, présentes et futures au Canada

Les émissions de gaz à effet de serre sous forme de CO_2, de N_2O et de CH_4 sont un résultat inévitable des activités agricoles. Par exemple, le labourage du sol accélère la décomposition de la matière organique qu'il contient, ce qui se traduit par une émission nette de CO_2. Ces sols contiennent ainsi moins de matière organique que des sols intacts. Le défrichage, notamment dans le cas des terres chernozémiques des provinces des Prairies qui, à elles seules, constituent 80 % des terres agricoles du Canada, a causé une perte rapide de 15 à 30 % de la matière organique du sol (Gregorich *et al.*, 1995). La modification

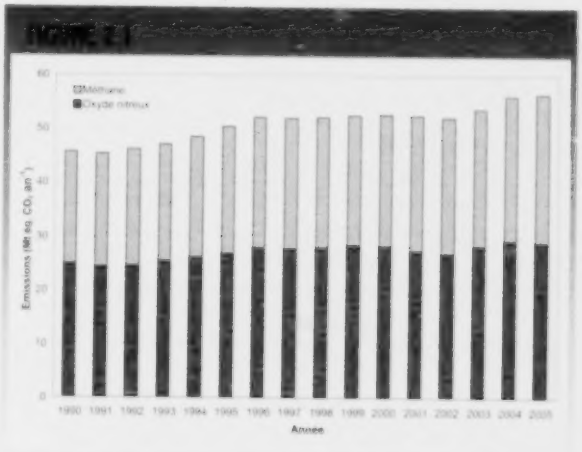
d'autres types de couverture végétale, comme les forêts ou les prairies, cause aussi des émissions nettes de CO_2. Avec le temps, le taux de diminution de la matière organique du sol s'est estompé dans certaines régions. En fait, la gestion des cultures et de l'eau a transformé le paysage agricole canadien, qui, de source nette de CO_2, a atteint une quasi-neutralité à l'égard du CO_2, comme on le verra ci-dessous.

Les terres à l'état naturel émettent du N_2O par des processus naturels. Mais, dans les terres agricoles, ces processus sont accélérés, en raison de la disponibilité accrue d'azote (N) sous ses différentes formes. Plus particulièrement, cette augmentation des émissions de N_2O provient de l'utilisation d'engrais azotés synthétiques, de la décomposition des résidus de culture et de la matière organique du sol, ainsi que de la migration du N par lessivage, ruissellement et volatilisation. L'industrie de l'élevage génère aussi des quantités importantes de CH_4 et de N_2O. Chez les ruminants, une partie de l'énergie contenue dans les aliments consommés (3 à 10 %) est perdue sous forme de CH_4, tandis que des quantités additionnelles de CH_4 et de N_2O sont émises durant l'entreposage du fumier et suivant son épandage sur les terres.

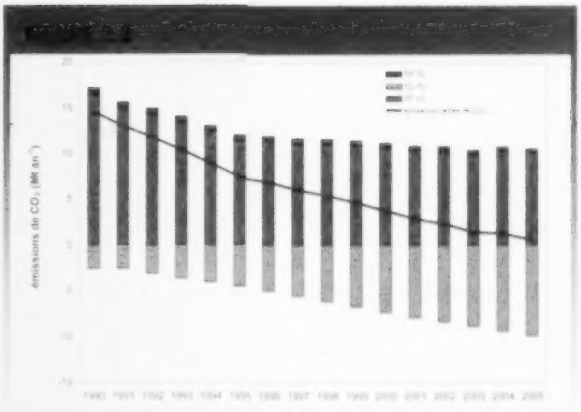
Il existe plusieurs programmes de suivi des émissions de GES en provenance des agroécosystèmes canadiens. Dans le cadre du Programme national d'analyse et de rapport en matière de santé agroenvironnementale (PNARSA) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, le bilan des GES d'origine agricole a été estimé pour chaque année de recensement, depuis 1981 (Desjardins et Riznek, 2001; Desjardins *et al.*, 2005). Les émissions de gaz à effet de serre provenant des agroécosystèmes canadiens font aussi partie des estimations annuelles de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Environnement Canada (EC) est l'organisme du gouvernement fédéral qui a la principale responsabilité de faire rapport aux gestionnaires de la CCNUCC. En 2004, EC a cependant délégué la responsabilité de l'inventaire des GES provenant des terres agricoles à Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). En vue de s'acquitter de ses obligations face à EC, AAC a mis au point le Système de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports sur les gaz à effet de serre d'origine agricole du Canada (SSCR-AgCan), un système transparent et vérifiable pour estimer les émissions et le piégeage des GES par les terres agricoles gérées. Le *Rapport d'inventaire national* du Canada de 2006 destiné à la CCNUCC est le premier rapport qui inclut les estimations provenant du SSCR-AgCan. EC a publié ces estimations dans son rapport national d'inventaire annuel : *Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* (Environnement Canada, 2007). Les estimations débutent en 1990, l'année de référence, et sont mises à jour annuellement afin d'inclure les estimations de l'année la plus récente, ainsi que les améliorations à la méthodologie de calcul qui résultent de l'évolution des connaissances.

En 1990, les émissions totales de GES du Canada se chiffraient à 596 Mt d'équivalent CO_2, dont 46 Mt d'équivalent CO_2 (ou 7,7 %) étaient attribuables aux émissions de CH_4 et de N_2O du secteur agricole (Environnement Canada, 2007). En 2005, les émissions totales de GES du Canada étaient passées à 747 Mt d'équivalent CO_2, une augmentation de 25 % par rapport à l'année de référence 1990, alors que les émissions de CH_4 et de N_2O provenant du secteur agricole en 2005 se chiffraient à 57 Mt d'équivalent CO_2 (7,6 % du total national), ce qui représente une augmentation de 24 % par rapport à l'année de référence 1990 (*figure 2.1*). En 2005, le secteur agricole était responsable de 66 % des émissions de N_2O et de 25 % des émissions de CH_4 au Canada.

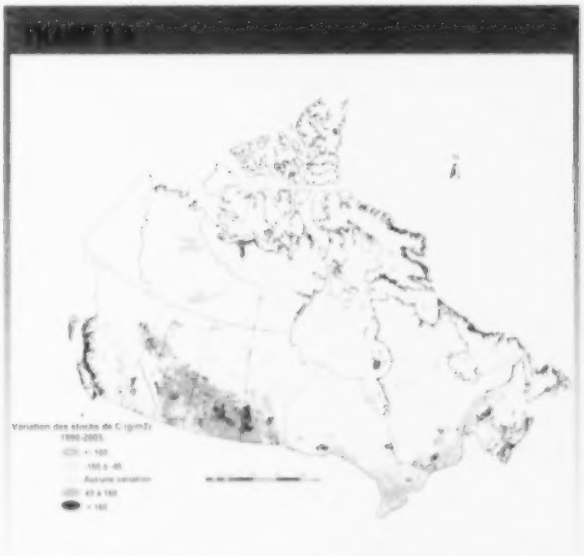
Les émissions de dioxyde de carbone provenant de l'utilisation des terres et du changement d'affectation des terres (UTCAT) agricoles sont illustrées à la *figure 2.2*. Les trois catégories UTCAT qui relèvent de l'agriculture sont : la conversion de



Émissions de méthane et de oxyde nitreux provenant des écosystèmes agricoles du Canada, entre 1990 et 2005.



Sources et puits de dioxyde de carbone associés aux divers usages des terres agricoles et de leurs variations, entre 1990 et 2005.



Variation des stocks de carbone du sol dans les terres agricoles au Canada entre 1990 et 2005.

terres de pâturage en terres cultivables (TP-TC), les terres cultivées qui demeurent des terres cultivées (TC-TC) et les terrains forestiers convertis en terres cultivables (TF-TC). Depuis 1990, la catégorie TP-TC a été une source relativement mineure et constante de CO_2, la catégorie TC-TC a été un puits relativement important et croissant de CO_2 et la catégorie TF-TC, une source relativement majeure, mais décroissante, de CO_2. En chiffres nets, les catégories UTCAT abordées ici sont passées de l'état de source de 14 Mt de CO_2 à l'état approximativement neutre en ce qui a trait aux émissions de CO_2. Entre 1990 et 2005, la variation des stocks de C dans les 30 premiers centimètres des terres agricoles canadiennes, pour la catégorie TC-TC, est illustrée à la *figure 2.3*. Pendant cette période, les émissions de CO_2 provenant des principales activités consommatrices d'énergie de l'agriculture canadienne sont passées de 19,3 à 20,0 Mt de CO_2 (J. Dyer, 2008).

Les émissions de méthane et d'oxyde de diazote provenant du secteur agricole peuvent être divisées en quatre grandes catégories : la fermentation entérique (CH_4), la gestion du fumier (CH_4 et N_2O), les terres agricoles (N_2O) et les émissions indirectes (N_2O). La fermentation entérique constitue la principale source d'émission de CH_4, tandis que les terres agricoles comptent pour la majorité des émissions de N_2O. L'augmentation des émissions de GES dans ces deux catégories entre 1990 et 2005 résulte essentiellement de l'accroissement des populations de bétail. Par exemple, la population des bovins de boucherie est passée d'environ 12 millions de têtes en 1990 à 16 millions en 2005. Cette augmentation s'explique en partie par l'augmentation de la demande pour la viande de bœuf, mais l'augmentation récente peut être en partie attribuable à la crise de la vache folle, qui a provoqué une interruption des exportations en direction des États-Unis. De même, la population de porcs, responsable d'une bonne part des émissions de CH_4 provenant des systèmes de gestion du fumier, est passée d'environ 10 millions de têtes en 1990 à 15 millions en 2005, et la population totale de volailles est passée d'environ 100 millions de têtes en 1990 à 133 millions en 2005. L'augmentation des populations de porcs et de volailles résulte exclusivement d'une augmentation de la demande pour des produits carnés. La population de vaches laitières est le seul important secteur de production animale au Canada à avoir accusé un déclin entre 1990 et 2005, passant de 1,4 million de têtes en 1990 à 1,1 million en 2005. Les gains appréciables dans la production laitière qui ont été réalisés au cours de cette période ont permis de continuer à répondre à la demande, malgré la diminution des effectifs de vaches laitières. Grâce à ces gains d'efficacité, les émissions de GES par litre de lait produit ont diminué d'environ 10 % entre 1990 et 2001 (Vergé *et al.*, 2007b; Dyer *et al.*, 2008).

Dans les écosystèmes agricoles du Canada, la tendances des émissions futures de GES seront déterminées par bon nombre de facteurs, y compris les politiques nationales sur les systèmes de production, la demande pour la viande et les

fibres (Vergé *et al.*, 2007a), les marchés bioénergétiques émergents (Smith *et al.*, 2007) et les systèmes d'échange de crédits d'émission de carbone mis en place aux échelons national et international. Il n'est donc pas possible de tirer des conclusions simples quant à l'évolution future des émissions de GES provenant des exploitations agricoles au Canada. Comme on prévoit que la population humaine augmentera à l'échelle nationale et planétaire, il semble inévitable que l'on voudra continuer à améliorer les rendements des cultures et que les populations d'animaux domestiques continueront d'augmenter pour répondre à la demande. En conséquence, à moins que de meilleures techniques de gestion soient mises au point pour optimiser l'assimilation de l'azote par les cultures et pour réduire les émissions de GES associées à la fermentation entérique et à la gestion du fumier, il semble probable que les émissions de GES provenant du secteur agricole canadien continueront d'augmenter.

Les émissions provenant des systèmes de gestion du fumier pourraient être atténuées par un compostage à aération passive (Pattey *et al.*, 2005) et au moyen de nouvelles méthodes de digestion anaérobie du fumier et de récupération du biogaz en vue de la production d'énergie. On estime que 30 % du fumier provenant de la population d'animaux domestiques du Canada pourrait être soumis à une digestion anaérobie. Si cette pratique était appliquée à cette échelle, on pourrait réduire les émissions de GES de 30 Mt d'équivalent CO_2, en raison d'une réduction à la fois de la consommation d'énergie sous forme de combustibles fossiles grâce au biogaz, d'une réduction de la production d'engrais (le produit de digestion du fumier est un engrais naturel d'excellente qualité) et d'une réduction des émissions directes provenant des systèmes de gestion du fumier (C. Monreal, 2007).

Sur le plan des émissions de CO_2, on a constaté que les terres agricoles du Canada, qui étaient une source nette de CO_2 de 14 Mt en 1990, tendent maintenant vers la neutralité (0 Mt CO_2). Cette tendance s'explique notamment par une augmentation du carbone séquestré dans les terres agricoles (TC-TC dans la figure 2.2), grâce à l'adoption de pratiques sans travail du sol, à une diminution du recours à la jachère et à une augmentation des systèmes de cultures vivaces aux dépens des systèmes de cultures annuelles dans les provinces des Prairies (Desjardins *et al.*, 2005). Ce piégeage du carbone par les terres agricoles devrait se poursuivre dans l'avenir proche, si les exploitants agricoles continuent d'adopter de meilleures pratiques de gestion (MPG) qui améliorent la production agricole et la qualité de l'environnement. Toutefois, les terres agricoles ne seront pas en mesure de séquestrer du carbone indéfiniment, pour plusieurs raisons : en premier lieu, tous les systèmes sol/culture/climat finissent par atteindre un état d'équilibre, sur le plan de la capacité à stocker le carbone. Ensuite, afin de maintenir les stocks de carbone, les exploitants agricoles doivent continuer à pratiquer les MPG qui ont à l'accumulation de carbone, car l'abandon de ces pratiques entraînera des émissions de CO_2 et une diminution nette du carbone organique du sol (COS). Les pratiques de gestion qui ont abouti à l'accumulation de COS dépendent par ailleurs de conditions climatiques favorables. Si le climat se réchauffait de manière appréciable, les réserves de carbone diminueraient probablement considérablement (Smith *et al.*, 2008).

2.3 Options pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et/ou augmenter les puits de carbone dans les terres agricoles du Canada

Comme nous l'avons mentionné, les émissions agricoles de GES sont associées à divers aspects de la production de cultures et d'animaux d'élevage. Par conséquent, une solution pour atténuer les émissions de ces gaz pourrait consister à choisir les pratiques agricoles les plus appropriées en fonction des circonstances (Desjardins *et al.*, 2001). Toutefois, les cycles des nutriments au sein des agroécosystèmes sont étroitement reliés, et les pratiques de gestion destinées à réduire les émissions d'un GES pourraient, en fait, augmenter les émissions d'un autre. C'est pourquoi, lorsqu'on évalue l'efficacité des pratiques de gestion, il importe de prendre en considération la réduction nette des émissions de l'ensemble des GES (CO_2, CH_4 et N_2O).

2.3.1. Dioxyde de carbone (CO_2)

Dans les agroécosystèmes, le carbone existe sous forme de CO_2 atmosphérique, de biomasse végétale ou de matière organique du sol. Chaque année, de grandes quantités de carbone sont transférées entre ces réservoirs. Le CO_2 atmosphérique est fixé par les cultures lors de la photosynthèse et une partie de ce carbone retourne au sol par l'intermédiaire des résidus de culture, de la desquamation des racines et de l'exsudation racinaire. Enfin, les organismes tels que les champignons et les bactéries oxydent les composés organiques en utilisant le carbone

comme source d'énergie. Le CO_2 produit par ce processus respiratoire est libéré dans l'atmosphère. Malgré leur importance, ces transferts de carbone sont remarquablement équilibrés; le captage associé à la photosynthèse est largement contrebalancé par le processus respiratoire. Ce résumé du cycle du carbone dans l'écosystème agricole montre que le réservoir naturel et durable de carbone dans ce système est la matière organique du sol, et que tout gain ou perte de substance organique du sol correspond à une perte ou à un gain de CO_2 atmosphérique. En conséquence, l'atténuation des émissions nettes de CO_2 des terres agricoles se traduira essentiellement par une augmentation des stocks de matière organique du sol. L'exportation de biomasse végétale sous forme de produits tels que des matériaux de construction et les pastilles de biocarburant destiné au chauffage pourrait entraîner une réduction des émissions nettes de GES.

La matière organique du sol correspond, en fait, à la somme des matières végétales qui se trouvent à divers stades de décomposition dans le sol. Il existe deux options pour augmenter les stocks de carbone dans les sols agricoles :
i) augmenter les apports annuels de résidus de culture;
ii) ralentir les processus de décomposition des sols. Les apports annuels de résidus de culture sont influencés par tous les facteurs qui entrent en jeu dans la culture agricole, à savoir les conditions météorologiques, les nutriments, le type de culture, la fréquence des récoltes, le type de travail du sol, etc. La décision de ramasser ou non certains résidus de culture (p. ex. les pailles des céréales) a aussi des conséquences évidentes sur les apports annuels de carbone dans les sols.

Il est possible de réduire la vitesse de décomposition des matières organiques du sol par l'adoption de différentes pratiques agricoles. La préparation classique du lit de semences nécessite un travail du sol pour éliminer les mauvaises herbes et incorporer les résidus de culture dans le sol. Cette étape entraîne par ailleurs une diminution de la densité du sol à proximité de la surface. Semer une culture directement dans les résidus de la culture de l'année précédente (c.à-d. sans travail du sol) est une solution de rechange aux pratiques classiques qui influe sur la décomposition du carbone organique du sol. Dans de tels systèmes de culture sans travail du sol, le faible déplacement de sol et le taux de décomposition réduit (comparativement à l'aération et à la décomposition plus intenses qui caractérisent le labour classique) favorisent la formation de grands agrégats de sol dans lesquels la matière organique est physiquement protégée des agents décomposeurs. En outre, les résidus de culture à la surface des sols non labourés réduisent l'évaporation de l'humidité contenue dans le sol, augmentant d'autant l'efficacité de l'utilisation de l'eau, comparativement aux systèmes de culture avec labour. En conséquence, le rendement des cultures et le retour au sol des résidus des cultures sont souvent accrus dans les systèmes de culture sans labour, surtout dans les climats semi-arides. Les systèmes de culture sans labour peuvent entraîner une diminution de la production dans les régions humides, surtout dans les sols à texture fine où l'aération peut devenir limitée.

La jachère, pratique consistant à ne cultiver aucune plante durant une année lors de la rotation des cultures, a gagné en popularité dans les Prairies semi-arides du Canada, vers le milieu du 20e siècle. Elle a été adoptée dans un souci de conserver l'eau et, donc, de favoriser le rendement des cultures en cas de sécheresse. Or, comme la terre n'est pas cultivée pendant l'année où elle est en jachère, aucun résidu de culture ne retourne au sol, ce qui se traduit par une diminution des stocks de carbone organique du sol (COS), comparativement aux systèmes de culture en continu. De plus, les sols en jachère sont habituellement plus chauds et plus humides que les sols cultivés, ce qui augmente la vitesse de décomposition de la matière organique. En conséquence, dans les Prairies canadiennes, le carbone peut être séquestré dans les sols agricoles si on diminue la fréquence des jachères. C'est d'ailleurs ce que l'on fait depuis le milieu des années 1970. Le recours à la jachère a atteint un maximum de 11,4 Mha en 1976, mais est en diminution constante depuis, et se situait à 5,4 Mha en 2001 (Gameda *et al.*, 2007).

Une autre option pour atténuer les émissions nettes de CO_2 des terres agricoles consiste à planter des arbres, des arbustes ou des graminées sur les terres marginales. Lorsque l'humidité du sol est adéquate, il est possible d'augmenter les stocks de carbone dans les terres agricoles en augmentant la biomasse des plantes vivaces. Cependant, comme la productivité des terres marginales est faible, la séquestration de carbone n'y sera pas aussi importante que dans les terres cultivées, plus productives.

Le *tableau 2.1* (Janzen *et al.*, 2005) résume les estimations récentes des taux de stockage du carbone dans les sols qu'il serait possible d'atteindre avec divers types de changement des pratiques de gestion agricole. Les taux possibles de gain de carbone indiqués dans le tableau sont des taux moyens pour une durée projetée de 20 ans. Le niveau de confiance

TABLEAU 2.1 : Estimation des pratiques qui pourraient être employées au Canada afin d'augmenter le stockage du carbone dans les terres cultivées et les terres de pâturage (d'après Janzen *et al.*, 2005).

Pratique	Superficie (10^6 ha)	Taux (Mg C ha^{-1} an^{-1})	Certitude (élevée, (moyenne, faible)
TERRES CULTIVÉES			
1. Travail du sol réduit	4 à 6	0,0 à 0,4	M
2. Élimination de la jachère	3	0,0 à 0,5	E
3. Inclusion de plus de plantes fourragères dans la rotation des cultures	4	0,0 à 0,5	M
4. Augmentation du retour des résidus par l'accroissement du rendement (p. ex. fertilisation, irrigation, meilleurs cultivars) ou par le fait de ne pas ramasser ou brûler les résidus végétaux	5	0,0 à 0,3	M
5. Restauration d'un pâturage ou d'un boisé	1	0,2 à 1,0	E
6. Emploi de résidus organiques (p. ex. fumier, biosolides, résidus de culture) de manière plus efficace, surtout pour restaurer les sols épuisés	1	0,1 à 0,5	M
TERRES DE PÂTURAGE			
1. Amélioration des pratiques de pâturage (p. ex. changement de l'intensité ou de la fréquence de pâturage)	10	0,0 à 0,1	F
2. Augmentation de la productivité (p. ex. fertilisation, irrigation, nouvelles espèces ou cultivars)	1	0,0 à 0,3	M

illustre le degré de consensus scientifique autour des taux suggérés de gain de carbone. « E » représente un degré de certitude élevé dans les chiffres théoriques, « M » indique qu'il existe un consensus raisonnable au sujet de l'existence d'un effet, malgré un certain niveau de controverse, et « F » indique que l'existence même d'un effet est controversée.

2.3.2 Oxyde de diazote (N_2O)

La production de N_2O dans les sols dépend de deux facteurs principaux : i) la quantité d'azote minéral dans le sol disponible pour les réactions de nitrification et de dénitrification et ii) le degré d'aération du sol (qui dépend habituellement de son taux d'humidité), qui détermine si la dénitrification, la plus importante source de N_2O, sera favorisée. La nitrification est l'oxydation microbienne de l'ammonium (NH_4^+) en nitrate (NO_3^-) en aérobiose; la dénitrification est la réduction microbienne du nitrate en azote moléculaire (N_2) en anaérobiose. Dans les deux cas, le N_2O est un intermédiaire ou un sous-produit formé pendant la réaction, mais qui ne subit pas une oxydation ou une réduction complètes.

La récolte des cultures et, dans certains cas, le lessivage déplacent des quantités importantes d'azote, qui doivent être remplacées pour que soit maintenue la fertilité des terres agricoles. La fertilisation des terres agricoles est donc une composante essentielle des systèmes de culture. Toutefois, cet apport d'azote entraîne souvent des changements brusques dans les quantités des diverses formes d'azote dans le sol, causant des augmentations temporaires de la teneur du sol en azote. Ce phénomène augmente à son tour la production et l'émission de N_2O (Burton *et al.*, 2008). Les cycles de gel et dégel du sol ainsi que la fonte des neiges au printemps augmentent aussi les émissions de N_2O à partir des champs fertilisés (Grant et Pattey, 1999; Pattey *et al.*, 2007, 2008). Dans l'est du Canada, ces émissions pourraient représenter environ 30 à 50 % des émissions annuelles de N_2O.

Les pratiques de gestion des engrais azotés visant à réduire les émissions de N_2O à partir des terres agricoles doivent être conçues de manière à éviter l'accumulation d'azote minéral dans le sol, en synchronisant l'apport de fertilisants avec les besoins des végétaux (Zebarth *et al.*, 2008). Ainsi, idéalement, la quantité d'azote ajoutée ne doit pas dépasser les besoins des végétaux, et il devrait être ajouté près des

racines, sous une forme facilement absorbée par les plantes. La quantité d'engrais ajoutée joue un rôle critique dans les émissions de N_2O, car elles augmentent de manière non linéaire en fonction de l'azote ajouté (Grant et Pattey, 2003; Grant *et al.*, 2006).

La détermination des quantités d'azote qu'il faut ajouter sous forme d'engrais synthétique pour atteindre les objectifs fixés dépend, par ailleurs, des quantités d'azote qui seront libérées pendant la saison de croissance par la minéralisation de la matière organique dans le sol. Les producteurs canadiens peuvent utiliser des analyses qui fournissent une estimation de la contribution d'un sol donné aux besoins en azote des cultures. Les antécédents d'exploitation agricole influent aussi sur la contribution du sol en matière d'azote. La décomposition des résidus de culture des légumineuses comme le soya et la luzerne, pendant l'année qui suit leur culture, fournira généralement de 25 à 40 kg d'azote par hectare (Drury *et al.*, 2008). Les engrais doivent donc combler la différence entre les besoins azotés totaux des végétaux et l'azote produit par la minéralisation de la matière organique du sol. En appliquant une stratégie de gestion rationnelle des engrais azotés, on pourra réduire les besoins en engrais synthétiques (Burton *et al.*, 2008).

Il est rarement possible d'obtenir une synchronisation parfaite entre l'application d'engrais et l'assimilation par la culture, en raison de difficultés techniques, agronomiques ou économiques. Toutefois, cette notion devrait toujours être prise en considération lors de la conception des programmes de fertilisation. La forme et le mode d'application de l'engrais peuvent aussi influer sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote par la culture et, donc, sur les quantités de N_2O produit (Burton *et al.*, 2008). Par exemple, l'ammonium est rapidement nitrifié dans le sol lorsque les conditions de température et d'humidité sont idéales. Ainsi, pour une application d'azote dans un sol bien aéré, l'azote sous la forme nitrate générera moins de N_2O que l'azote sous la forme ammonium parce qu'il n'y a pas de nitrification, source de N_2O. D'un autre côté, si l'azote est appliqué dans des conditions d'aération imparfaite (sols très humides ou compacts), la forme ammonium est préférable parce qu'elle réduit, à court terme, les risques de dénitrification, la source majeure de formation de N_2O (Gillam *et al.*, 2008).

Certaines substances chimiques peuvent, lorsqu'elles sont ajoutées au sol, inhiber la nitrification. La production de N_2O peut alors être largement diminuée, étant donné qu'en retardant la nitrification, on diminuera du même coup la dénitrification par diminution du nitrate, son substrat azoté. Les engrais azotés à libération lente peuvent également permettre d'étaler la distribution de l'apport azoté sur une longue période et, ainsi, limiter l'accumulation d'azote minéral dans le sol; toutefois, ces engrais sont coûteux et l'on n'a pas encore fait la preuve qu'ils permettent de réduire l'ensemble des émissions de N_2O. Le mode d'application de l'engrais peut par ailleurs avoir une influence directe sur l'accessibilité de l'azote pour les racines des végétaux. Règle générale, l'incorporation de l'azote dans le sol est plus efficace que son application en surface, et l'épandage en bandes à proximité des rangs (et des racines) est préférable à une application à la volée (Harapiak *et al.*, 1993).

Le fumier des exploitations d'élevage renferme une quantité considérable d'azote, qui peut-être employé pour la fertilisation des cultures. Une meilleure gestion du fumier est nécessaire pour limiter les pertes d'azote au cours de l'entreposage du fumier (Pattey *et al.*, 2005) et pour utiliser le fumier en guise d'engrais au moment le plus opportun (Mkhabela *et al.*, 2008; Rochette *et al.*, 2006). En optimisant l'usage du fumier, les producteurs pourront réaliser des économies appréciables au chapitre des engrais synthétiques, tout en réduisant de manière importante les émissions de N_2O (Rochette *et al.*, 2008a).

L'azote ajouté aux terres agricoles ne provient pas uniquement des engrais synthétiques ou du fumier. Les cultures de légumineuses comme le soya, les lentilles et la luzerne peuvent fixer l'azote présent dans l'atmosphère (l'air que nous respirons est composé à 80 % d'azote moléculaire ou N_2), grâce à une association symbiotique avec les rhizobactéries. Celles-ci peuvent convertir l'azote moléculaire de l'atmosphère en ammonium, qui peut être métabolisé par la plante. Jusqu'à tout récemment, on croyait que cette fixation d'azote s'accompagnait d'une libération appréciable de N_2O. Toutefois, des études récentes ont révélé que cette réaction produit en fait peu de N_2O (Rochette et Janzen, 2005; Pattey *et al.*, 2008). Les résidus de culture de légumineuses retournés au sol sont relativement riches en azote et leur décomposition stimule la production de N_2O dans une plus grande mesure que les résidus de végétaux non fixateurs d'azote. Cependant, l'émission de N_2O par les résidus de culture de légumineuses est faible, comparativement aux émissions générées par l'emploi d'engrais azotés. En conséquence, le fait de remplacer une culture de non-légumineuses fertilisée avec des engrais par

une culture de légumineuses dans une rotation culturale a pour effet de réduire les émissions nettes de N_2O. Par exemple, la conversion d'un système de monoculture du maïs à un système de rotation maïs/soya entraînera une réduction des émissions de N_2O.

Les pratiques de travail du sol influent sur la production de N_2O par leur effet sur la densité du sol (et donc sur l'aération et la teneur en eau) et sur l'incorporation des résidus de culture. Les pratiques de réduction ou d'élimination du travail du sol consistent à limiter le recours aux opérations qui déplacent le sol et, souvent, à semer entre les résidus de culture laissés à la surface du sol après la récolte de l'année précédente. Le fait de ne pas travailler le sol entraîne plusieurs différences importantes, par rapport au labour classique, qui peuvent influer sur la production et l'émission de N_2O. Lorsqu'il n'y a pas de travail du sol, les résidus de culture, les engrais et les amendements organiques sont laissés à proximité de la surface, plutôt que d'être incorporés à la terre. La décomposition des résidus et les transformations de l'azote minéral se font donc dans des conditions de température et d'humidité qui sont différentes de celles associées au labour classique. La faible aération des sols argileux ou soumis à des conditions humides augmente le taux de dénitrification et le potentiel de production de N_2O. En fait, on estime qu'au Canada, les systèmes agricoles sans travail du sol augmentent les émissions de N_2O dans l'Est, où le climat est humide, tandis qu'elles les réduisent dans les Prairies semi-arides (Grant *et al.*, 2004). En conséquence, dans les Prairies, les effets bénéfiques de l'adoption de pratiques sans travail du sol sur la qualité du sol et sur l'environnement ne sont pas diminués par une augmentation des émissions de N_2O. En revanche, les pratiques sans labour pour les sols à texture fine dans les climats humides (p. ex. dans l'est du Canada) est susceptible d'augmenter de manière notable la production et l'émission de N_2O.

En ce qui concerne les émissions de N_2O, lorsque les cultures sont irriguées, il est préférable d'irriguer sur des périodes courtes mais fréquentes. On évite ainsi d'augmenter considérablement la teneur en eau du sol et les cycles d'hydratation/assèchement qui peuvent entraîner l'émission de N_2O (Ellert et Janzen, 2008). De même, le drainage artificiel de l'excès d'eau afin d'assurer des conditions de croissance adéquates a pour effet de réduire les émissions importantes de N_2O.

En conditions de jachère, le sol est plus humide et plus chaud que pendant la période de croissance de la culture. La jachère favorise donc la décomposition de la matière organique du sol. L'azote minéralisé du sol, s'il n'est pas assimilé par la culture, alimente les transformations microbiennes productrices de N_2O par la nitrification et, possiblement, la dénitrification. En effet, il a été montré que les émissions de N_2O par les terres en jachère sont d'importance similaire à celles observées dans les terres cultivées recevant des engrais azotés. L'adoption de pratiques sans travail du sol ou à travail réduit a permis d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau, tout en diminuant le recours à la jachère. Ainsi, dans les Prairies, l'augmentation du recours aux systèmes de culture en continu sans travail du sol a permis d'augmenter la production agricole régionale, sans augmenter la production de N_2O (Gregorich *et al.*, 2008; Rochette *et al.*, 2008b et c).

2.3.3 Méthane (CH_4)

Le CH_4 est produit lorsque les matières organiques sont décomposées en l'absence d'oxygène. Dans les exploitations agricoles, cela se produit surtout dans les voies digestives des ruminants (fermentation entérique), dans les structures d'entreposage du fumier et dans les terrains marécageux.

Les stratégies visant à réduire la production de CH_4 résultant de la fermentation entérique peuvent être regroupées en deux catégories, soit celles qui visent à améliorer la productivité animale et celles qui visent à réduire la production de CH_4 pendant la digestion de la nourriture ingérée par l'animal. L'amélioration de la productivité animale se traduit par une baisse des émissions de CH_4 en raison d'une diminution des pertes d'énergie alimentaire sous forme de CH_4 et du nombre d'animaux nécessaires pour obtenir une même quantité de produit final donné (viande ou lait). Ces gains de productivité peuvent être réalisés en améliorant la nutrition, la gestion, la reproduction ou la génétique des animaux. Une des stratégies possibles d'amélioration nutritionnelle consiste à choisir des glucides qui influent sur la proportion des divers acides gras volatils produits au cours de la fermentation entérique. De même, en diminuant les glucides de la paroi cellulaire ou en augmentant l'amidon dans le régime alimentaire des animaux, on favorise la production de propionate et on diminue la formation de CH_4 dans le rumen. Aussi, les régimes à base de grains entraînent habituellement une diminution du pH dans le rumen, ce qui a pour effet d'inhiber la prolifération de la flore méthanogène (microorganismes producteurs de CH_4). On peut également diminuer la production de CH_4 en augmentant la proportion

de concentrés ou de légumineuses dans la ration alimentaire, en donnant des fourrages plus digestibles et en augmentant la fréquence des repas.

Il est par ailleurs possible de réduire la production de CH_4 en agissant sur la fermentation du rumen. L'ajout de certains lipides, qui jouent un rôle d'accepteurs d'électrons pendant la biodégradation dans le rumen, tend à diminuer la production de CH_4. D'autres substances, comme les ionophores, améliorent l'absorption des aliments, diminuant de ce fait la disponibilité des substrats pour les méthanogènes (McGinn *et al.*, 2004). Ces stratégies se sont révélées efficaces sur de courtes périodes.

Environ 11 % du CH_4 émis par les exploitations agricoles au Canada proviennent de l'entreposage du fumier (Environnement Canada, 2007). Alors qu'une partie du CH_4 provient du fumier entreposé sous forme solide, la principale source de CH_4 est le fumier entreposé sous forme liquide (Pattey *et al.*, 2005). Il existe plusieurs méthodes pour réduire la fermentation pendant l'entreposage du fumier liquide. Diminuer la quantité de substrats organiques dans le fumier en augmentant l'indice de consommation ou en utilisant moins de litière aura pour effet de réduire la quantité de substrats disponibles pour les méthanogènes. À l'instar des autres processus biologiques, la vitesse de fermentation augmente avec la température. Par conséquent, en maintenant une température annuelle moyenne basse, grâce à l'utilisation de structures d'entreposage souterraines, et en vidant le réservoir de fumier avant les mois chauds d'été, on obtient une diminution des émissions de CH_4. La fermentation s'arrête lorsque le fumier est épandu sur une terre aérée. C'est pourquoi l'abrègement de la durée d'entreposage entraîne une fermentation incomplète du fumier et réduit les émissions de CH_4.

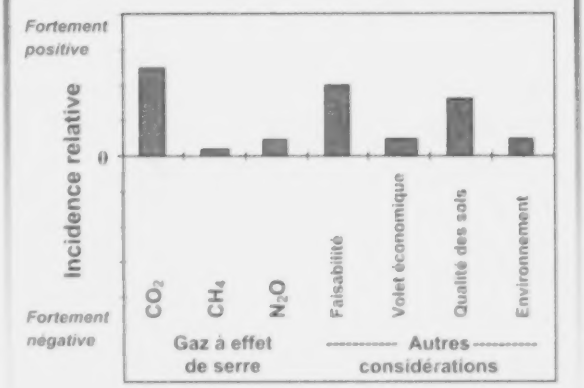
Il est aussi possible d'obtenir une réduction nette des émissions de CH_4 à partir du fumier entreposé en brûlant simplement le CH_4 produit ou en le captant pour l'utiliser comme source d'énergie. Le traitement du fumier dans un digesteur anaérobie produit du biogaz, un mélange de CH_4 (environ 65 %), de CO_2 et d'autres gaz à l'état de traces. La simple combustion du biogaz réduit le potentiel de réchauffement des gaz émis, étant donné que le CO_2 est un gaz à effet de serre 21 fois moins puissant que le CH_4. L'avantage pour l'environnement est encore plus grand lorsque le biogaz est employé dans les exploitations agricoles au lieu des combustibles fossiles, que ce soit pour le chauffage ou la production d'électricité. En outre, la digestion anaérobie du fumier de bétail en conditions contrôlées pour produire du biogaz peut fournir aux éleveurs l'occasion d'augmenter le revenu net de l'exploitation agricole.

Le compostage avec aération passive est une autre technique de traitement du fumier susceptible de réduire les émissions nettes de GES. Dans cette technique, on composte le fumier solide sans retourner le tas de fumier (Mathur, 1991). On a récemment démontré que cette technique est celle qui permet la réduction la plus importante des émissions de CH_4 et de N_2O pendant l'entreposage (Pattey *et al.* 2005).

2.4 Incidences globales des stratégies d'atténuation des GES

Bien qu'il soit souhaitable de réduire au maximum les émissions de GES, il faut garder à l'esprit que les producteurs agricoles gagnent leur vie avec les produits qu'ils cultivent et les animaux qu'ils produisent. En conséquence, les pratiques d'atténuation susceptibles d'être adoptées dans les exploitations agricoles doivent être économiquement viables. En outre, d'autres facteurs, tels que la facilité de mise en œuvre et les répercussions sur la qualité du sol et de l'environnement, doivent être pris en compte avant qu'une pratique d'atténuation des GES puisse

FIGURE 2.4



L'évaluation de l'incidence nette d'une stratégie d'atténuation des GES, telle qu'une réduction de l'intensité du labour, ne doit pas tenir uniquement compte des effets sur les émissions de GES.

DÉCLARATION TRANSPARENTE ET VÉRIFIABLE DES PUITS/SOURCES ANTHROPOGÈNES DE CO_2 ASSOCIÉES À LA GESTION DES TERRES AGRICOLES, CONFORMÉMENT À LA CCNUCC

En tant que pays signataire de la CCNUCC, le Canada doit soumettre un inventaire annuel des émissions et de la séquestration anthropiques de GES, y compris celles liées à la gestion des terres agricoles. La présente section décrit le système de comptabilisation du carbone mis au point par Agriculture et Agroalimentaire Canada pour ses estimations de CO_2 déclarées dans le cadre du Système de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports sur les gaz à effet de serre d'origine agricole du Canada (SSCR-AgCan). Pour connaître le détail des estimations des émissions de CH_4 et de N_2O, consulter Vergé *et al.* (2006) et Rochette *et al.* (2008c), respectivement.

PROCÉDURE DE COMPTABILISATION DU CARBONE

Les changements dans l'utilisation ou la gestion des terres qui modifient l'équilibre entre les ajouts et les pertes de carbone organique entraînent des augmentations ou des diminutions de la teneur en carbone du sol. S'il n'y a pas de changement dans l'utilisation ou la gestion des terres, les stocks de carbone du sol tendront, à long terme, vers un état d'équilibre avec les conditions environnementales.

L'équation permettant d'estimer les variations de la teneur en carbone du sol dans les terres agricoles causées par des changements dans la gestion des sols (CGS) est la suivante :

$$\Delta C = F * S \qquad \text{Équation (1)}$$

Où :

ΔC = variation du stock de carbone du sol, en Mg C an^{-1}

F = variation annuelle moyenne du COS sujet aux CGS, en Mg C $ha^{-1}an^{-1}$

S = superficie touchée par le changement de gestion des sols, en ha

La principale source des données nationales sur les activités agricoles (S dans l'équation 1) est le Recensement de l'agriculture. Ces données sont disponibles pour toutes les exploitations agricoles à intervalles de 5 ans (1991, 1996, 2001, etc.).

Il existe un important corpus de publications canadiennes et internationales sur les pratiques de gestion connues pour augmenter le COS dans les terres cultivées (Bruce *et al.*, 1999; Janzen *et al.*, 1998). Le COS qui a été inclus dans cet inventaire est celui pour lequel on connaît bien l'ampleur et le sens de la variation. Les données du Recensement ont fourni de tels renseignements pour la réduction de l'intensité du labour (McConkey *et al.*, 2003; Janzen *et al.*, 1998), la réduction du recours à la jachère (Campbell *et al.*, 2000; Campbell *et al.*, 2005) et la conversion des cultures annuelles aux cultures vivaces (Bremer *et al.*, 2002; Campbell *et al.*, 2007).

Afin d'estimer F dans l'équation 1, on a utilisé le modèle Century (version 4) pour simuler la dynamique du carbone et des éléments nutritifs dans les écosystèmes des prairies, des terres cultivées et des forêts du Canada (Parton *et al.*, 1987; 1988). Ce modèle a souvent été utilisé pour simuler le COS et a été mis à l'épreuve et validé avec un succès modéré pour les conditions prévalant au Canada (Bolinder *et al.*, 2004; Campbell *et al.*, 2000; Carter *et al.*, 2003; Grant *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 1996; Monreal *et al.*, 1997; Voroney et Angers, 1995; Pennock et Frick, 2001). Le modèle a été étalonné et validé au moyen de procédés mis au point par Smith *et al.* (1997, 2000, 2001). Les facteurs relatifs au carbone employés dans le modèle sont estimés par la différence entre les stocks de carbone dans le sol entre deux simulations : une analyse initiale correspondant aux conditions générales de gestion des terres (qui excluent les changements spécifiques dans les pratiques) et une analyse « factorielle » dans laquelle tous les paramètres sont gardés constants, à l'exception du changement de gestion des terres considéré.

Les calculs de la variation du carbone à l'échelle nationale portent sur environ un million de quantités, chacune assortie d'une incertitude. Afin d'analyser l'effet net sur les incertitudes, la méthode Monte Carlo a été employée, qui utilise de manière aléatoire des données à partir des distributions de probabilités de plusieurs centaines de quantités globales de variation du carbone. Les distributions de probabilité des variations du carbone à partir de l'équation (1) ont été dérivées d'une étude analytique fondée sur l'incertitude relative à F et S. On considère que l'incertitude relative à F est composée de deux volets : une incertitude de situation et une incertitude inhérente. L'incertitude de situation résulte de l'incertitude entourant l'état initial du carbone, au moment de la survenue du CGS, et de l'incertitude relative aux systèmes agricoles auxquels le CGS a été appliqué. L'incertitude inhérente est l'incertitude relative aux prédictions du modèle et/ou aux données empiriques associées à des états initiaux du carbone et à des systèmes d'exploitation agricole connus.

être recommandée. Si une pratique de gestion donne un résultat très favorable sur le plan de l'atténuation des GES, mais très peu favorable sur le plan d'autres paramètres considérés comme importants par la société, alors il faut déterminer la valeur nette de la pratique avant de la recommander. La *figure 2.4* montre l'incidence nette d'une réduction de l'intensité du travail du sol dans l'Ouest canadien. Dans la plupart des cas, cette pratique est bénéfique parce qu'elle augmente la séquestration du carbone dans la terre, soustrayant ainsi du CO_2 de l'atmosphère. Elle a un effet relativement neutre sur le plan des émissions de CH_4 et, en général, les systèmes sans labour sont associés à des émissions moindres de N_2O. En outre, cette pratique, très facile à réaliser et économiquement viable, présente des avantages additionnels en ce qu'elle améliore la qualité du sol et est bénéfique pour l'environnement. Par conséquent, l'adoption de pratiques sans labour dans l'Ouest canadien est hautement recommandable en tant que stratégie d'atténuation des GES.

2.5 Où en sommes-nous par rapport à l'objectif 6.2.1?

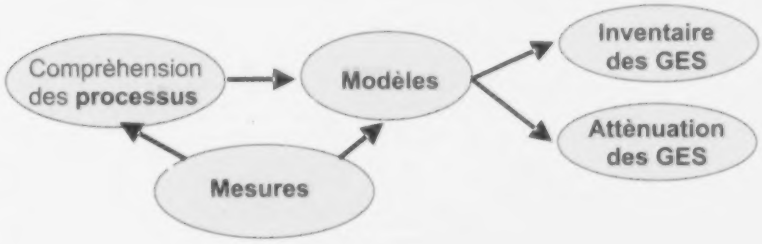
Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, l'objectif de la recherche subventionnée par le PRDE sur les puits de GES dans le secteur agricole était de faire progresser et de mettre en application notre compréhension collective des puits édaphiques dans les terres agricoles. Plus particulièrement, les objectifs étaient de : 1) étudier les variables et les processus qui régissent les flux de GES dans les écosystèmes agricoles et 2) mettre au point des modèles pour quantifier l'effet de la gestion agricole sur la captation des GES. Cette recherche a été menée dans un cadre de recherches plus large portant sur les flux de GES au sein des écosystèmes agricoles, et des scientifiques de diverses disciplines et de nombreux centres y ont participé. Le financement par le PRDE a favorisé une accélération importante de ce travail et a aidé à combler des lacunes dans la compréhension d'aspects qui n'avaient pas encore été suffisamment explorés. Cette recherche a suivi l'approche collaborative intégrée, illustrée à la *figure 2.5*. Les résultats escomptés sont un inventaire robuste et fiable des GES et un ensemble formel et fiable de pratiques applicables à l'échelle nationale pour l'atténuation (réduction maximale) des émissions de GES provenant des exploitations agricoles. Étant donné la complexité des écosystèmes agricoles et de leurs flux de GES, ces objectifs ne peuvent être atteints que par l'adoption de modèles, allant de simples équations à des modèles de simulation complexes. À leur tour, ces modèles dépendent d'une compréhension approfondie des processus intervenant dans l'émission et le piégeage des GES, une compréhension que seule la recherche fondamentale bien ciblée peut permettre d'atteindre. Les modèles nécessitent aussi la mise au point de méthodes fiables de mesure des flux de GES, à la fois pour élaborer les modèles et pour vérifier leurs résultats. L'approche décrite à la figure 2.5 procède de manière continue et interactive, les améliorations progressives dans chaque catégorie améliorant graduellement la sensibilité et la rigueur des activités associées.

Quel est le chemin parcouru au chapitre de la recherche depuis l'an 2000? On pourra trouver des détails sur certaines découvertes dans la liste des articles cités en annexe. Parmi les domaines de la recherche où les progrès ont été les plus importants figurent les suivants :

a) **Amélioration de notre compréhension de la dynamique du carbone et de l'azote qui sous-tend les émissions et le piégeage des GES** : Par exemple, l'étude approfondie des fractions de matière organique a permis d'identifier les formes qui sont associées au

FIGURE 2.5

Représentation schématique du flux de l'information dans la recherche sur les émissions de gaz à effet de serre à partir des terres agricoles au Canada.



stockage à long terme du carbone. Armés de ces données, les chercheurs ont pu déterminer les pratiques qui favorisent l'accumulation de carbone dans le sol en facilitant le stockage du carbone à long terme.

b) **Amélioration dans la quantification des flux de GES secondaires, notamment ceux qui sont reliés à l'utilisation d'énergie** : Par exemple, la recherche financée par le PRDE a permis de parvenir à des estimations plus précises des émissions de CO_2 associées à la consommation de carburants fossiles dans les exploitations agricoles canadiennes (Dyer et Desjardins, 2003a, b, 2006, 2007). Ces émissions, qui varient selon les pratiques, doivent être comptabilisées lors du calcul du bénéfice net associé aux pratiques proposées pour atténuer les émissions de GES. D'autres chercheurs (ayant également bénéficié d'un financement du PRDE) ont fourni une estimation du bilan énergétique net pour le biodiésel produit à partir du canola et du soya (Smith *et al.*, 2007). Leurs travaux ont permis de montrer qu'une importante fraction des avantages énergétiques de ces biocarburants est annulée par l'énergie utilisée pour sa production, mais que leur usage reste quand même associé à un gain d'énergie net (c.-à-d. la quantité de carburant fossile épargnée par le biodiésel produit est supérieure à la quantité de carburant fossile utilisée pour le produire).

c) **Nouvelles méthodes de mesure des flux** : De nombreuses techniques nouvelles ou modifiées ont été mises au point pour mesurer les flux de GES, surtout le CH_4 et le N_2O. Ces méthodes peuvent être appliquées à diverses échelles, que ce soit à des sources locales ponctuelles ou à de vastes régions, afin d'améliorer les estimations des émissions agricoles et de mettre à l'épreuve la fiabilité des modèles. Par exemple : 1) Utilisation de la concentration de CH_4 mesurée par laser en circuit ouvert combinée à un modèle de dispersion du transport atmosphérique permettant de caractériser une source telle qu'une lagune à fumier ou une étable (Desjardins *et al.*, 2007b); 2) Prélèvement d'échantillons d'air associé à un déplacement d'air montant ou descendant au moyen d'une plate-forme portée par un aéronef volant à une vitesse de 55 m s^{-1} à une altitude de 100 m et analyse subséquente de la différence de concentration de N_2O en laboratoire avec un spectromètre à diode laser ajustable, afin d'estimer le flux de N_2O sur une échelle de plusieurs centaines de kilomètres carrés (Pattey *et al.*, 2006b et 2007). La robustesse et la précision des techniques de mesure des flux de N_2O associés aux terres agricoles sur toute l'année a ainsi été améliorée (Pattey *et al.*, 2006a).

d) **Meilleure compréhension de la relativité de l'efficacité des mesures d'atténuation selon les régions** : Par exemple, une revue exhaustive des essais à long terme sur le terrain a montré que l'adoption de stratégies sans labour peut entraîner une augmentation considérable de la teneur en carbone du sol, mais que cela n'est pas toujours le cas. Typiquement, l'adoption de pratiques sans labour entraîne une séquestration de carbone dans les terres plus sèches de l'Ouest canadien, mais pas dans les terres plus humides du centre et de l'est du pays.

e) **Analyse intégrative de plus grande portée des flux et du piégeage des GES** : Au départ, la recherche sur les GES provenant des terres agricoles du Canada était davantage axée sur la séquestration du carbone dans les sols. Depuis lors, toutefois, les scientifiques ont reconnu que les autres GES (N_2O et CH_4) doivent eux aussi être pris en compte lors de l'évaluation des avantages associés à une pratique. En conséquence, les études ont de plus en plus porté sur les interactions entre les gaz; par exemple, dans les études sur les gains en carbone des sols en conditions sans labour, on s'est également attaché à déterminer les répercussions de cette pratique sur les émissions de N_2O. Les modèles fondés sur les processus (tels que ECOSYS et DNDC) ont été améliorés de manière à permettre une meilleure prédiction des émissions de N_2O à partir des terres cultivées. En outre, on a développé des modèles – encore rudimentaires (par exemple, un logiciel de calcul des GES) – afin d'examiner les émissions globales des exploitations agricoles et de permettre aux intervenants de déterminer comment une pratique est susceptible de modifier les émissions *nettes* associées à une exploitation agricole (Janzen *et al.*, 2006; voir http://ncgavs.usask.ca/ghg_calculator/ pour télécharger le logiciel de calcul des GES).

f) **Enrichissement des bases de données relatives aux flux de GES** : Les recherches financées par le PRDE et par d'autres organismes ont permis d'accumuler de nombreuses bases de données sur les GES, à partir d'études menées dans toutes les régions du Canada. Ces bases de données sont des ressources précieuses

et durables pour la mise au point d'éventuels modèles améliorés (Boles, 2007) et de méthodes pour établir l'inventaire national des GES (Rochette *et al.*, 2008c).

g) **Avancement de l'expertise** : Une autre conséquence, souvent méconnue, est l'accumulation progressive, émanant de la recherche, d'une expertise robuste, multidisciplinaire, dans la science des émissions et du piégeage des GES. Cette expertise est précieuse non seulement à l'égard de l'avancement de la science, mais aussi parce qu'elle constitue un avantage considérable dans l'élaboration d'une politique publique améliorée devant l'urgence croissante des questions relatives aux changements climatiques.

h) **Nouveau regard sur la complexité** : Dans les premiers stades de la recherche sur les GES dans l'agriculture canadienne, les scientifiques se sentaient un peu dépassés par la variabilité et l'incertitude énormes des estimations en matière d'émission et de piégeage des GES. Depuis, ils ont réalisé d'importants progrès dans l'acceptation et l'intégration de cette incertitude dans la recherche. Bien que bon nombre de nos estimations soient encore assorties d'une incertitude considérable, nous sommes mieux en mesure aujourd'hui de faire des estimations qui, tout en ne niant pas l'incertitude, fournissent de l'information utile aux producteurs, aux décideurs et aux autres intervenants.

i) **Meilleure définition de la place occupée par la recherche dans la science globale des GES** : Une des retombées importantes des recherches financées par le PRDE est l'interaction entre les scientifiques du domaine de l'agriculture et ceux des autres biomes. Alors que la recherche sur les GES en milieu agricole était une science pratiquée plutôt en vase clos, se limitant aux exploitations agricoles, elle a élargi sa portée, qui dépasse aujourd'hui les flux de carbone, d'azote et d'énergie *à l'intérieur* des agroécosystèmes, et englobe aussi les échanges qui ont lieu entre les agroécosystèmes et les autres biomes.

Ces résultats, combinés à d'autres, sont autant de jalons qui ont permis à la recherche sur les GES de progresser, notamment avec l'élaboration d'un système d'inventaire des GES fiable et exhaustif, d'obtenir des modèles améliorés et une meilleure connaissance des pratiques susceptibles de permettre une réduction des émissions de GES dans les exploitations agricoles.

Références

Boehm, M., Junkins, B., Desjardins, R., Kulshrestha, S., et Lindwall, W. 2004. Sink potential of canadian agricultural soils. *Climatic Change* 65: 297-314.

Boles, S.H. 2007. Developing a database and user interface at the ecodistrict scale in Canada for the *Denitrification and Decomposition* (DNDC) model to estimate N_2O and CO_2 emission factors. Agriculture and Agri-Food Canada internal report. 13pp.

Bolinder, M.A. 2004. *Contribution aux connaissances de la dynamique du C dans les systèmes sol-plante de l'est du Canada.* [Contribution to the understanding of soil organic carbon dynamics for eastern Canadian agroecosystems] Ph. D. Thesis. Université Laval. Ste-Foy, QC. 125 pp.

Bremer, E., Janzen, H.H., et McKenzie, R.H. 2002. Short-term impact of fallow frequency and perennial grass on soil organic carbon in a Brown Chernozem in southern Alberta. *Can. J. of Soil Sci.* 82: 481-488.

Bruce, J.P., M. Frome, E. Haites, H. Janzen, R. Lal, et K. Paustian. 1999. Carbon sequestration in soils. *J. Soil and Water Conservation*. 52: 382-389.

Burton, D.L., Zebarth, B.J., Gillam, K.M. et MacLeod J.A. 2008. Effect of rate and time of fertilizer nitrogen application on N_2O emissions from potato. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Campbell, C.A., Janzen, H.H., Paustian, K., Gregorich, E.G., Sherrod, L., Liang, B.C., et Zentner, R.P. 2005. Carbon storage in soils of the North American Great Plains: Effect of cropping frequency. *Agronomy Journal*, 97(2): 349-363.

Campbell, C.A., VandenBygaart, A.J., Zentner, R.P., McConkey, B.G., Smith, W., Lemke, R., Grant, B., et Jefferson, P.G. 2007. Quantifying carbon sequestration in a minimum tillage crop rotation study in semiarid southwestern Saskatchewan. *Can. J. of Soil Sci.* 87: 235-250.

Campbell, C. A., Zentner, R. P., Liang, B-C., Roloff, G., Gregorich, E. G. et Blomert, B. 2000. Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan – Effect of crop rotations and fertilizers. *Can. J. Soil Sci.* 80: 179-192.

Carter, M.R., Angers, D.A., Gregorich, E.G., et Bolinder, M.A. 2003. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Can. J. of Soil Sci.* 83: 11-23.

Desjardins, R. L. et Riznek, R. 2001. Agricultural greenhouse gas budget: Chapitre 14. Environmental Sustainability of Canadian Agriculture: Report of the Agri-Environmental Indicator Project. http://www.agr.gc.ca/policy/environment/pubs_aci_01_f.phtml

Desjardins, R.L., Kulshreshtha, S.N., Junkins, B., Smith, W., Grant, B., et Boehm, M. 2001. Canadian greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 60: 317-326.

Desjardins, R.L., McBain, M.C., Kaharabata, S., Pattey, E., Worth, D., Verge, X., et Gao, Z. 2007b. Measuring methane emissions from agricultural sources. *Journal of Applied Environmental Science* 2: 31-39.

Desjardins, R.L., Sivakumar, M.V.K. et C. de Kimpe. 2007a. The contribution of agriculture to the state of climate: Workshop summary and recommendations. *Agric. For. Meteorol*. 142: 314-324.

Desjardins, R.L., Smith, W., Grant, B., Campbell, C. et Riznek, R. 2005. Management strategies to sequester carbon in agricultural soils and to mitigate greenhouse gas emissions. *Climatic Change*. 70: 283-297.

Desjardins, R.L., Vergé, X., Hutchinson, J., Smith, W., Grant, B., McConkey, B. et Worth, D. 2005. Greenhouse Gases: Chapitre 21. Environmental Sustainability of Canadian Agriculture: Agri-Environmental Indicator Report Series—Report #2. http://www.agr.gc.ca/env/naharp-pnarsa/pdf/chap21_f.pdf

Drury, C.F., W.E. Reynolds, C.S. Tan, T.W. Welacky, W. Calder, et N.B. McLaughlin. 2006. Emissions of nitrous oxide and carbon dioxide: Influence of tillage type and nitrogen placement depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 570-581.

Drury, C.F., Yang, X.M., Reynolds, W.D. et McLaughlin, N.B. 2008. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from monoculture and rotational cropping of corn, soybean and winter wheat. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Dyer, J.A. 2008. Communication personnelle. Consultant Privée. Cambridge, Ontario.

Dyer, J.A. et Desjardins, R.L. 2003a. Simulated farm fieldwork, energy consumption and related greenhouse gas emissions in Canada. *Biosystems Engineering*. 85: 503-513.

Dyer, J.A. et Desjardins, R.L. 2003b. The impact of farm machinery management on the greenhouse gas emissions from Canadian agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*. 22: 59-74.

Dyer, J.A. et Desjardins, R.L. 2006. Carbon dioxide emissions associated with the manufacturing of tractors and farm machinery in Canada. *Biosystems Engineering*. 93: 197-118.

Dyer, J.A. et Desjardins, R.L. 2007. Energy based GHG emissions from Canadian agriculture. *Journal of the Energy Institute*. 80: 93-95.

Dyer, J.A., Vergé, X.P.C., Desjardins, R.L. et Worth, D. 2008. Long term trends in the GHG emissions from the Canadian dairy industry. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Ellert, B.H. et Janzen, H.H. 2008. Nitrous oxide emissions from irrigated land as influenced by legumes, manure, and fertilizer. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Environment Canada, 2007. National Inventory Report: 1990-2005. Greenhouse gas sources and sinks in Canada. Environment Canada, Greenhouse gas division. 611pp.

Gameda, S., Qian, B., Campbell, C.A., Desjardins, R.L., 2007. Trends in summer fallow and climate in the Canadian Prairies. *Agric. For. Meteorol.* 142: 170–185.

Gillam, K.M., Zebarth, B.J. et Burton, D.L., 2008. Nitrous oxide emissions from denitrification and the partitioning of gaseous losses as affected by nitrate and carbon addition and soil aeration. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Grant, B., Smith, W., Desjardins, R.L., Lemke, R. et Li, C. 2004. Estimated N_2O and CO_2 emissions as influenced by agricultural practices in Canada. *Climate Change*. 65: 315-332.

Grant, R.F., Pattey, E., Goddard, T.W., Kryzanowski, L.M. et Puurveen, H. 2006. Modelling the Effects of Fertilizer Application Rate on N_2O Emissions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (1): 235-248.

Grant, R.F. et Pattey E., 1999. Mathematical modelling of nitrous oxide emissions from an agricultural field during spring thaw. *Global Biogeochem. Cycles* 13(2): 679-694.

Grant, R. et Pattey, E., 2003. Modelling variability in N_2O emissions from fertilized agricultural fields. *Soil Biology and Biochemistry*. 35(2): 225-243.

Gregorich, E.G., Angers, D.A., Campbell, C.A., Carter, M.R., Drury, C.F., Ellert, B.H., Groenevelt, P.H., Holmstrom, D.A., Monreal, C.M., Rees, H.W., Voroney, R.P. et Vyn, T.J. 1995. Changes in soil organic matter. In, Acton, D.F., et Gregorich, L.J. (Eds.) The Health of our Soils: Towards Sustainable Agriculture in Canada. *Agriculture and Agri-Food Canada Publication* 1906/F. 138pp.

Gregorich, E.G., Rochette, P., St-Georges P., McKim, U.F., et Chan, C. 2008. Tillage effects on N_2O emissions from soils under corn and soybeans in eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Harapiak, J.T., Malhi, S.S., Campbell, C.A. et Nyborg, M. 1993. Fertilizer N application practices, p. 251-313. In, Rennie, D.A., Campbell, C.A. et Roberts, T.L. (eds.). Impact of macronutrients on crop responses and environmental sustainability of the Canadian prairies – a review. Canadian Society of Soil Science, Ottawa, ON.

IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden et D. Xiaosu (Eds.). Cambridge University Press, UK. 944 pp.

Janzen, H.H., Angers, D.A., Boehm, M., Bolinder, M., Desjardins, R.L., Dyer, J.A., Ellert, B.H., Gibb, D.J., Gregorich, E.G., Helgason, B.L., Lemke, R., Massé, D., McGinn, S.M., McAllister, T.A., Newlands, N., Pattey, E., Rochette, P., Smith, W., VandenBygaart, A.J., et Wang, H. 2006. A proposed approach to estimate and reduce net greenhouse gas emissions from whole farms. *Can. J. of Soil Sci.* 86: 401-418.

Janzen, H.H., Campbell, C.A., Izaurralde, R.C., Ellert, B., Juma, N.G., McGill, W.B., et Zentner, R.P. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 47: 181-195.

Janzen, H.H., Desjardins, R.L., Angers, D.A., Boehm, M.M., Campbell, C.A., Carter, M., Gibb, D., Gregorich, E.G., Kaharabata, S., Lemke, R., Massé, D., McAllister, T., McConkey, B., Rochette, P., et Smith, W. 2005. Mitigation practices for agricultural land in Canada: A summary of 'expert opinion'. Agriculture and Agri-Food Canada Internal Report. Lethbridge Alberta.

Kroeze, C., Mosier, A., et Bouwman, L. 1999. Closing the global N_2O budget: A retrospective analysis 1500-1994. *Global Biogeochemical Cycles*. 13: 1-8.

Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Cole, C.V., 1998. The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Ann Arbor Press, Chelsea, MI, USA, pp. 128.

Liang, B. C., Gregorich, E. G. et MacKenzie, A. F. 1996. Modeling the effects of inorganic and organic amendments on organic matter in a Quebec soil. *Soil Sci.* 161: 109-114.

Mathur S.P. 1991. Composting processes. In: Martin A.M. (ed.). Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products. Elsevier, London, pp. 147–186.

McConkey, B.G., Liang, B.C., Campbell, C.A., Curtin, D., Moulin, A., Brandt, S.A., Lafond, G.P. 2003. Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils. Soil and Tillage Research, 74:81-90.

McGinn, S.M., Beauchemin, K.A., Coates, T., et Columbatto, D. 2004. Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast and fumaric acid. *Journal of Animal Science*. 82: 3346-3356.

Mkhabela, M.S., Gordon, R., Burton, D., Madani, A., et Hart, W. 2008. Nitrous oxide production and soil mineral nitrogen status following application of hog slurry and inorganic fertilisers to acidic grassland soils. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Monreal, C. 2007. Communication personelle. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa Ontario.

Monreal, C.M., Zentner, R.P. et Robertson, J.A. 1997. An analysis of soil organic matter dynamics in relation to management, erosion and yield of wheat in long-term crop rotation plots. *Can. J. Soil Sci.* 77: 553-563.

Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., et Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci Soc Am. J.* 51:173-1179.

Parton, W.J., Stewart, J.W.B., Cole, C.V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5:109-131.

Pattey, E., Blackburn, L.G. et Strachan, I.B., Desjardins, R.L., Dow, D. 2008. Spring thaw and growing season N_2O emissions from a field planted with edible peas and a cover crop. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Pattey E., Edwards, G.C., Desjardins, R.L., Pennock, D., Smith W., Grant B., MacPherson, J.I., 2007. Tools for quantifying N_2O emissions from Agroecosystems. *Agric. For. Meteorol.*142(2-4): 103-119.

Pattey, E., Edwards, G., Strachan, I.B., Desjardins, R.L., Kaharabata, S. et Wagner Riddle C., 2006a. Towards standards for measuring greenhouse gas flux from agricultural fields using instrumented towers. Can. J. Soil Sci. 86: 373-400.

Pattey, E. Strachan, I.B., Desjardins, R.L., Edwards, G.C., Dow, D., et MacPherson, I.J. 2006b. Application of a tunable diode laser to the measurement of CH_4 and N_2O fluxes from field to landscape scale using several micrometeorological techniques. Special Issue "Tribute to Marv Wesely" *Agric. For. Meteorol.*136: 222-236.

Pattey, E., Trzcinski, M.K., et Desjardins, R.L. 2005. Quantifying the reduction of greenhouse gas emissions as a result of composting dairy or beef cattle manure. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 72(2):173-187.

Pennock, D.J., et Frick, A.H. 2001. The role of field studies in landscape-scale applications of process models: an example of soil redistribution and soil organic carbon modeling using Century. *Soil & Tillage Research*. 58(3/4): 183-191.

Rochette, P. et Janzen, H.H. 2005. Towards a revised coefficient for estimating N_2O from legumes. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 73:171-179.

Rochette, P., Angers, D.A., Chantigny, M.H., Gagnon, B. et Bertrand, N. 2008a. Soil-surface N_2O fluxes in soils of contrasting textures fertilised with liquid and solid dairy cattle manures. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Rochette, P., D.A. Angers, M.H. Chantigny, B. Gagnon, et N. Bertrand. 2006. *In situ* mineralization of dairy cattle manures as determined using soil-surface CO_2 fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:744-752.

Rochette, P., D.E. Worth, E. Huffman, J.A. Brierley, B.G. McConkey, J.Y. Yang, J.J. Hutchinson R.L. Desjardins, Lemke, R. et S. Gameda. 2008b. Estimation of N_2O emissions from agricultural soils in Canada. II- 1990-2005 Inventory. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Rochette, P., D.E. Worth, R.L. Lemke, B.G. McConkey, D.J. Pennock, C. Wagner-Riddle, et R.L. Desjardins. 2008c. Estimation of N_2O emissions from agricultural soils in Canada. I- Development of a country-specific methodology. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

Ruddiman, W.F., 2003. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*. 61, 261-293.

Schlesinger, W.H. 1995. An Overview of the Carbon Cycle, in Lal, R., Kimble, J., Levine, E., et Stewart, B.A. (eds.), *Soils and Global Change*, CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 9–25.

Smith, E.G., Janzen, H.H., et Newlands, N.K. 2007. Energy balances of biodiesel production from soybean and canola in Canada. *Can. J. Plant. Sci.* 87, 793-801.

Smith, W.N., Rochette, P., Monreal, C., Desjardins, R.L., Pattey, E., et Jaques, A. 1997. The rate of carbon change in agricultural soils in Canada at the landscape level. *Can. J. of Soil Sci.* 77: 219-229.

Smith, W.N., Desjardins, R.L., et Grant, B. 2001. Estimated changes in soil carbon associated with agricultural practices in Canada. *Can. J. of Soil Sci.* 81: 221-227.

Smith, W.N., Desjardins, R.L., et Pattey, E. 2000. The net flux of carbon from agricultural soils in Canada 1970-2010. *Global Change Biology*. 6(5): 558-568.

Smith, W.N., Grant, B.B., Desjardins, R.L., Qian, B., Hutchinson, J., et Gameda, S J. 2008. The potential impact of climate change on carbon in agricultural soils in Canada. *Climatic Change* (sous presse).

Sommer, R., Vlek, P.L.G., de Abreu Sá, T.D., Kielhauer, K., de Fátima Rodrigues Coelho, R., and Fölster, H. 2004. Nutrient balance of shifting cultivation by burning or mulching in the Eastern Amazon – evidence for subsoil nutrient accumulation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 68: 257-271.

Stern, D.I. et Kaufmann, R.K. 1996. Estimates of global anthropogenic methane emissions 1860-1993. *Chemosphere*. 33: 159-176.

Vergé, X.P.C, C. De Kimpe et Desjardins, R.L. 2007a. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. *Agricultural and Forest Meteorology*. 142: 255-269.

Vergé, X., Dyer, J.A., Desjardins, R.L. et Worth, D. 2007b. Greenhouse Gas Emissions from the Canadian Dairy Industry during 2001. *Agricultural Systems*. 94: 683-693.

Vergé, X., Desjardins, R.L., Worth, D., Hutchinson, J. 2006. Agri-Environmental Indicator - Greenhouse Gas Emissions, Methane component. Technical report: Net Methane Emission from Agro-ecosystems in Canada for the Years 1981, 1986, 1991, 1996 and 2001. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ontario. ISBN 0-662-72866-1.

Zebarth, B.J., Rochette, P., Burton, D.L. et Price, M. 2008. Effect of fertilizer nitrogen management on N_2O emissions in commercial corn fields. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

CHAPITRE 3

Les forêts du Canada – sources ou puits de carbone?

Coordonnateur et auteur principal | **P. Hall**

3.1 Introduction

Aux termes de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [CCNUCC], les pays membres doivent rendre compte des émissions et absorptions *anthropiques* annuelles, conformément aux lignes directrices établies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. Pour ce qui est des changements d'affectation des terres et de la foresterie, les lignes directrices du GIEC recommandent que soient déclarés les stocks de carbone de toutes les forêts qui « font l'objet d'interventions humaines périodiques ou permanentes qui influent sur les stocks de carbone ».

En conséquence, le Canada présente des rapports périodiques à la CCNUCC sur les émissions nationales de GES, y compris les variations nettes des stocks de carbone et les émissions de gaz à effet de serre autres que le CO_2 associées à des forêts de changement d'affectation des terres. Toutefois, la définition de ce qu'est une forêt selon les lignes directrices du GIEC présente une difficulté pour les pays qui possèdent de vastes écosystèmes forestiers dont une bonne partie n'est pas affectée par les activités humaines. Même si le Canada comprend environ 10 % de la superficie forestière mondiale et qu'environ 30 à 35 % du carbone terrestre de la planète se trouve dans la forêt boréale, les zones qui subissent l'influence des activités humaines, ou forêts « gérées », couvrent une superficie de beaucoup inférieure à la superficie boisée totale. Par conséquent, les estimations des stocks de carbone forestier, telles que déclarées auprès de la CCNUCC, sont établies en fonction des 238 millions d'hectares de forêts gérées, soit les forêts touchées par l'influence humaine directe ou des activités de gestion.

Les changements d'affectation des forêts pris en considération par la CCNUCC se limitent au boisement (la conversion de terrains non forestiers en forêts), au reboisement et au déboisement (la conversion de forêts à d'autres utilisations induite par l'activité humaine directe). Les négociateurs canadiens ont besoin d'un appui scientifique et d'analyses quantitatives concernant la contribution prévue des forêts et des activités de gestion forestière au bilan net des gaz à effet de serre. Parmi les grandes questions figurent les suivantes :

- les données de référence concernant les changements des stocks de carbone dans les forêts aménagées au cours des trente prochaines années;
- la gamme d'effets des divers scénarios de gestion des forêts, leurs résultats et leur coût;

- les effets probables d'un changement général sur les fluctuations des stocks de carbone forestier;
- la répartition des variations des stocks entre les effets dus aux activités humaines et les effets naturels ou indirectement causés par les activités humaines.
- la question à savoir s'il faut ou non rendre obligatoire l'inclusion des activités de gestion des forêts dans les déclarations;
- la façon de prendre en compte les effets, en termes absolus ou encore par rapport à des données de référence;
- la question à savoir s'il faut ou non débattre d'un plafond tant pour les sources que pour les puits de carbone;
- la façon de lier les sources et puits de gaz à effet de serre aux effets naturels et anthropiques.

Des modèles et des outils de comptabilisation sont nécessaires pour résoudre ces questions. les outils de surveillance, utilisés pour calculer les fluctuations des stocks de carbone pour des périodes données depuis 1990, nécessitent des informations détaillées sur les inventaires forestiers, les perturbations naturelles, les changements d'affectation des terres et les activités de gestion forestière. Des outils d'analyse de scénarios permettent de projeter les variations à venir des stocks de carbone à partir d'hypothèses quant aux taux futurs de perturbations, aux changements d'affectations des terres et aux activités de gestion forestière. Ces outils aident les gestionnaires et les décideurs à choisir des stratégies de gestion des forêts et des options en matière de politiques pour renforcer les puits de carbone. La possibilité de réclamer des crédits liés aux puits dépendra de la qualité et de l'incertitude des absorptions estimées par les puits et de notre capacité à prévoir les puits futurs. Les recherches connexes nécessaires pour se conformer aux exigences pertinentes de la CCNUCC doivent se concentrer sur les domaines suivants :

Modélisation des stocks de carbone forestier et de leurs changements. Les modèles sont les outils de synthèse qui permettent d'estimer les puits et sources de GES à l'échelle nationale à partir de données expérimentales et d'observation. D'importantes incertitudes demeurent concernant la dynamique du carbone et des GES dans des sols organiques profonds et des tourbières boisées, et l'interaction entre les milieux humides et les forêts des hautes terres. Il ne faut pas oublier que la plus grande partie de la forêt boréale, comme toute autre forêt, est constituée d'une combinaison complexe d'écosystèmes. Une meilleure compréhension des effets des perturbations naturelles sur la dynamique du carbone est aussi essentielle, tant pour les perturbations qui détruisent les peuplements, comme les incendies et les pullulations d'insectes, que pour d'autres, comme les insectes défoliateurs qui, sans provoquer un renouvellement du peuplement, entraînent un retard de croissance généralisé, mais peu de mortalité.

Répercussions des changements d'affectation des terres et de la gestion des forêts. Les activités de gestion des forêts ont une incidence sur la plupart des aspects de la dynamique des stocks de carbone forestier. Il est donc nécessaire de disposer d'évaluations détaillées sur les répercussions d'une gamme d'activités de gestion des forêts sur la dynamique du carbone, et ce à l'échelle régionale, en vue d'établir des rapports ou aux fins de négociations. Parmi ces activités, on compte les effets des mesures de protection (contre les incendies ou les insectes), les coupes de récupération, la préparation des sites, le reboisement, le boisement, la fertilisation ainsi que les différents modes d'exploitation forestière. Une meilleure évaluation quantitative du potentiel lié aux activités de gestion forestière sera une nécessité constante lors de la mise en œuvre d'une gestion forestière adaptée. Comprendre et mesurer les répercussions des activités de gestion forestière permettra de mieux établir la différence entre les effets causés directement ou indirectement par les activités humaines et les effets naturels.

Répercussions sur les forêts du changement planétaire. Le changement planétaire aura des conséquences marquées sur les stocks de carbone forestier, comme l'a montré la modélisation des taux de perturbations naturelles, particulièrement les feux de forêt et les dommages causés par les insectes. D'importantes questions d'ordre scientifique restent sans réponse en ce qui concerne l'évaluation des répercussions du changement planétaire sur les processus continus de croissance et de décomposition des forêts, et sur le bilan net du carbone résultant à l'échelle du peuplement. La modélisation des réactions des forêts est un domaine de recherche active qui requiert un financement continu : ainsi, les résultats de ces travaux permettront non seulement de mieux estimer le bilan du carbone, mais ils

contribueront aussi à l'élaboration de mesures d'atténuation et de stratégies d'adaptation.

Vérification des données concernant les puits forestiers. Les renseignements sur les caractéristiques et la dynamique des forêts obtenus par échantillonnage servent à établir des estimations vérifiables et claires des sources et puits de carbone forestier. La mise à l'échelle, l'estimation des erreurs et des incertitudes et les méthodes de vérification des informations obtenues par échantillonnage constituent d'importantes difficultés d'ordre scientifique. Il reste encore à examiner dans quelle mesure la télédétection et les mesures directes des concentrations atmosphériques de CO_2 permettent de vérifier les bilans régionaux de carbone. La réduction du degré d'incertitude des estimations des variations des stocks de carbone a des conséquences directes sur notre capacité de revendiquer des crédits de carbone, que ce soit pour des projets individuels ou à l'échelle de l'écosystème forestier.

Le Canada est reconnu sur la scène internationale pour ses recherches poussées sur le cycle du carbone forestier, pour l'élaboration de programmes de surveillance par télédétection et pour l'intégration de données provenant de diverses sources dans des outils de comptabilisation du carbone forestier. Les augmentations récentes du financement de ces recherches grâce au PRDE et à d'autres programmes ont permis d'accroître les activités de recherche et de nettement améliorer notre capacité à respecter les exigences de déclaration de la CCNUCC pour les crédits de puits et à conseiller nos négociateurs internationaux. Notre système de déclaration est fondé sur des résultats obtenus par modélisation et fait appel à un système d'établissement de rapport structuré conforme aux exigences mentionnées dans les Recommandations en matière de bonnes pratiques du GIEC. *[Voir l'encadré 1.0]*

Le présent chapitre résume les recherches sur les puits de GES effectuées dans le cadre du PRDE au cours des dernières années dans le but de résoudre un certain nombre de questions stratégiques générales. Dans un premier temps, on aborde les rôles passé, présent et futur de l'utilisation et de la gestion des forêts en tant que source ou puits de carbone atmosphérique et on examine quels en ont été les effets sur les émissions des GES provenant des forêts. Il est ensuite question du rôle des perturbations naturelles et des rétroactions climatiques dans les émissions actuelles et futures et des options qui existent pour réduire ces émissions ou pour renforcer les puits. Dans la section suivante, on examine nos capacités présentes de fournir des rapports transparents et vérifiables, selon les dispositions de la CCNUCC, en ce qui concerne les sources et les puits créés par l'homme comparativement aux sources et puits naturels dans le secteur forestier. Enfin, dans les dernières sections du chapitre, on évalue le chemin parcouru afin d'atteindre les objectifs de la section 6.2.1 du niveau d'objectifs du projet (PON) et quelles devront être les prochaines étapes.

3.2 Émissions de gaz à effet de serre provenant des forêts canadiennes

3.2.1 Utilisation et gestion des forêts dans le passé en tant que source ou puits de carbone atmosphérique

L'analyse de l'historique de la dynamique du carbone dans les écosystèmes forestiers canadiens montre que des changements importants sont survenus au cours du dernier siècle. Avant les années 1920, les forêts canadiennes présentaient un bilan de carbone neutre, c'est-à-dire qu'elles n'étaient ni un puits ni une source d'importance pour le dioxyde de carbone atmosphérique. De 1920 à environ 1970, il y a eu peu de perturbations naturelles comparativement à la période allant de 1860 à 1920. Par contre, l'industrie forestière, particulièrement l'industrie des pâtes et papiers et la production de matériaux de construction (comme le contreplaqué et le panneau de fibres), a connu une forte expansion. Les pratiques de foresterie impliquaient de vastes coupes à blanc qui ont modifié la succession naturelle des forêts, surtout les activités menées dans les forêts boréales riches en carbone, ce qui a produit d'importantes émissions de carbone. Toutefois, au même moment, a eu lieu la mise en place d'un programme de prévention et d'extinction des incendies dans de nombreux secteurs de la forêt boréale, là où les feux de forêt sont l'élément moteur de la succession naturelle. Les stocks de carbone se sont graduellement rétablis des effets d'une récolte accrue, mais les forêts ne sont pas redevenues un puits net avant les années 1950, et sont demeurées un important puits de carbone durant les trente années qui ont suivi.

Un des résultats remarquables de cette dynamique a été le changement subi par la structure des classes d'âge des forêts, qui se traduit par une augmentation de la proportion de forêts plus vieilles contenant davantage de biomasse et de

matière organique morte. De plus, la capacité de ces forêts plus vieilles d'absorber davantage de carbone diminue alors que leur sensibilité aux incendies et aux perturbations par les insectes augmente. De 1970 à 1989, l'incidence des perturbations naturelles, notamment les feux de friche et les infestations d'insectes, a grandement augmenté par suite des effets cumulatifs de l'exploitation forestière passée, des mesures de lutte contre les incendies et des changements climatiques. Cette hausse des taux de perturbation a fait diminuer les réservoirs de carbone de la biomasse, transférant une grande partie du carbone résiduel vers les bassins de matière organique morte qui s'est décomposée et a entraîné des rejets supplémentaires de carbone; l'effet net en a été une modification de l'état des forêts, de puits à source de carbone. Les projections de la dynamique des forêts montrent, qu'avec le temps, elles vont redevenir un puits de carbone, mais cette hypothèse dépend beaucoup des taux futurs de perturbation naturelle.

La nature des perturbations à grande échelle influe grandement sur la prévisibilité des émissions futures par les forêts. Ainsi, comme l'incidence et l'étendue d'un feu de forêt ne peuvent être projetées, il n'est pas possible d'établir une prévision fiable des émissions. D'un autre côté, les pullulations d'insectes surviennent périodiquement selon un cycle prévisible; les émissions attribuables à ces perturbations peuvent donc être projetées, surtout si on a déjà documenté les caractéristiques des dommages subis. Les résultats récents montrent que de longues périodes de sécheresse entraînent des émissions nettes par les forêts qui subissent un stress dû au manque d'humidité et que ces émissions se poursuivent pendant un ou deux ans après le retour de précipitations normales. Même s'il est difficile de quantifier ces émissions, on peut supposer qu'elles sont marquées lorsque la sécheresse touche de grandes superficies. De manière similaire, le déclin des forêts ou les phénomènes stochastiques, comme de grandes zones de chablis, causent des émissions de carbone qui n'ont pas encore été quantifiées.

Le Modèle du bilan du carbone pour le secteur forestier canadien (MBC-SFC) est utilisé pour estimer les changements passés des stocks de carbone de 1990 à nos jours, et les changements futurs des stocks de carbone jusqu'à la fin de la période d'engagement de 2012 du Protocole de Kyoto. L'information sur le carbone forestier découle des données provinciales et industrielles sur la croissance et le rendement, des modèles de croissance empiriques ou fondés sur les processus, et de données sur la croissance et le rendement issues de projets de boisement. Des données provenant des inventaires de la matière organique morte, du carbone organique du sol, de la biomasse et des phénomènes stochastiques à grande échelle sont incluses dans le modèle. Ces renseignements, ainsi que les données sur le cycle du carbone dans les sols forestiers et sur les changements d'affectation des terres depuis 1990 (obtenues par télédétection et coordonnées entre les secteurs d'affectation des terres), augmentent la capacité de prédiction du modèle. Toutefois, d'importantes améliorations doivent encore être apportées pour réduire les incertitudes de ces projections. Plus particulièrement, le modèle doit inclure l'effet de la variabilité du climat sur les processus des écosystèmes, mieux simuler la quantité de chute de litière (renouvellement des racines et décomposition de la matière organique), et tenir compte du rôle des tourbières, des terres humides et des perturbations naturelles. La sensibilité des bilans du carbone des forêts nationales aux répercussions causées par l'activité humaine doit aussi être mieux comprise et modélisée. De cette manière, les décideurs peuvent calculer quelles sont les probabilités que les forêts aménagées soient des puits de carbone, information requise par le Comité national des puits forestiers.

On prévoit que les récents changements des régimes de températures et de précipitations ainsi que les variations de la concentration atmosphérique de CO_2 à l'échelle mondiale auront un effet sur la production nette de l'écosystème (PNE) et sur la dynamique du carbone à cause de ce qu'il est convenu d'appeler l'effet de fertilisation. Les changements des conditions de croissance qui favorisent la croissance des forêts et, par le fait même, l'absorption de carbone favorisent aussi le processus de décomposition et le rejet de carbone. L'effet net de ces deux tendances opposées se répercutera sur les estimations sur la dynamique du bilan du carbone.

Les conclusions préliminaires en ce qui concerne la dynamique du carbone déduites des résultats obtenus par modélisation sont les suivantes :

- dans un climat plus chaud, l'augmentation de la sécheresse dans les provinces des Prairies risque de réduire le couvert forestier et la productivité des forêts, tandis que, dans les forêts de l'est du Canada, où les précipitations annuelles sont beaucoup plus abondantes, on observera probablement le maintien voire l'accroissement du couvert forestier et une augmentation de la croissance et de la productivité;

- il est préférable de laisser les résidus de récolte sur place pour optimiser la productivité et les stocks de carbone dans le sol dans les conditions actuelles de climat et de productivité;

- les perturbations à grande échelle dues à l'exploitation forestière, aux feux de forêt et aux dommages causés par les insectes ont d'importants effets directs sur le bilan du carbone.

Les sorties des modèles ont été améliorées en réduisant les incertitudes relatives aux relations entre l'âge du peuplement et la productivité primaire nette, et en raffinant les estimations de la chute de litière et du renouvellement des radicelles. Ces renseignements ont permis d'obtenir de meilleures estimations des effets des perturbations sur le bilan du carbone et d'établir une distinction entre les répercussions causées par l'homme et celles d'origine naturelle. Le degré de confiance dans les résultats obtenus par modélisation ne cesse de s'accroître au fur et à mesure que ces résultats se précisent grâce à l'intégration des données de nouvelles recherches dans les modèles. Il en résulte une confiance accrue dans les estimations et un constat sérieux de l'étendue de la variabilité des systèmes naturels, de l'impact des activités humaines et du risque associé à une variabilité climatique croissante. Il s'agit d'un processus continu qui évolue à mesure que des améliorations sont apportées aux données complémentaires sur le carbone du sol, les phénomènes stochastiques à grande échelle et les changements physiologiques de la végétation.

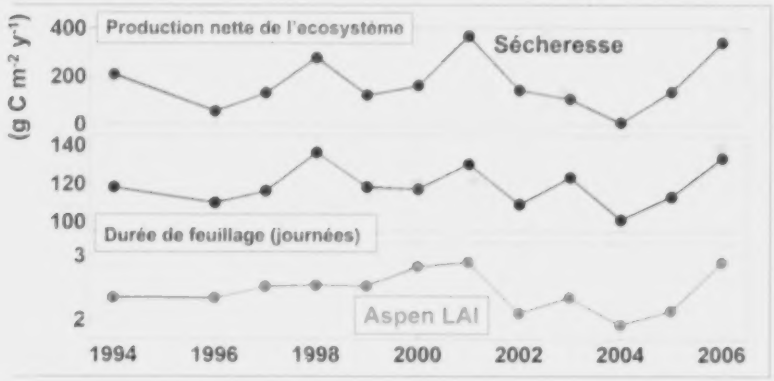
Le projet *Free-Air Carbon Dioxide Enrichment* (FACE) [http://aspenface.mtu.edu/] (en anglais seulement) est une expérience de modélisation à grande échelle qui utilise des applications factorielles de dioxyde de carbone et d'ozone troposphérique (au niveau du sol) sur des clones à croissance rapide de peuplier faux-tremble, de bouleau à papier et d'érable à sucre. L'expérience est conçue pour produire des fonctions dose-réponse aux fins de l'analyse du risque que pose l'ozone (O_3) pour les forêts. Un accroissement des concentrations de CO_2 stimule la croissance des arbres en hauteur et en diamètre, mais un apport d'ozone annule la fertilisation par le CO_2. Des concentrations élevées de CO_2 entraînent un retard de 5 à 7 jours de la sénescence automnale et une augmentation d'environ 12 % du dépérissement hivernal. On peut s'attendre à ce que la présence d'ozone aux concentrations actuelles vienne contrebalancer toute fertilisation causée par une augmentation de la concentration de CO_2. La présence d'O_3 peut aussi augmenter l'importance des dommages causés au feuillage par les maladies ou les insectes défoliateurs; le mécanisme d'une telle réaction réside dans une modification de la relation hôte-prédateur qui entraîne davantage de dommages. Au cours de cette expérience, on a recueilli de nombreuses données qui expliquent pourquoi une stimulation précoce de la croissance par l'augmentation de CO_2 tend à être neutralisée par des concentrations élevées d'ozone et par les dommages dus aux insectes et aux maladies. D'autres études sur la fertilisation ont montré des répercussions inattendues sur le taux de croissance et sur l'assimilation nette de carbone par les arbres forestiers, ce qui indique que, dans les conditions climatiques actuelles et prévues, il est peu probable que l'on puisse formuler des prévisions optimistes quant à une assimilation généralisée du carbone. Ces renseignements seront utilisés dans le MBC-SFC pour prévoir les réactions des forêts aux changements atmosphériques.

En Ontario, on a entrepris en 1994 une expérience sur la productivité du sol à long terme dans le but de déterminer les effets sur l'épinette noire (*Picea mariana*), le pin gris (*Pinus banksiana*) et le peuplier tremble (*Populus tremuloides*) du retrait de diverses quantités d'azote et de carbone du tapis forestier par l'exploitation forestière et la préparation du site. Les stocks de carbone ont été substantiellement accrus par l'ajout d'azote, en particulier quand cet ajout était couplé avec d'autres techniques sylvicoles comme la conservation des résidus de récolte, la gestion de la végétation et la gestion de la densité. D'autres études sont en cours sur les effets à long terme du dépôt d'azote atmosphérique. Les résultats obtenus au cours de ces expériences sur la productivité pourront ensuite être intégrés aux pratiques de gestion.

Les effets de la variabilité interannuelle du climat sur les bilans du carbone et de l'eau dans la forêt boréale font l'objet d'études qui analysent les mesures recueillies par des tours de flux situées au-dessus du couvert forestier. Les données sur les échanges de carbone, d'eau et d'énergie entre la forêt et l'atmosphère permettront de mieux comprendre l'hétérogénéité spatiale du cycle du carbone à l'échelle du paysage ainsi que les facteurs climatiques et biophysiques qui régissent la force des sources/puits de carbone. La base de données intégrée sur le peuplement ainsi obtenue sera utilisée pour valider les modèles des processus écosystémiques, améliorer les modèles du cycle du carbone à l'échelle nationale et élaborer des modèles

FIGURE 3.1

La décroissance de la PNE annuelle pendant et après une période de sécheresse.



fondés sur le climat pour analyser la croissance et le rendement. Jusqu'à présent, les données montrent que la forêt boréale est très sensible au réchauffement printanier, que la PNE est rapidement rétablie après l'exploitation forestière et que les cycles du carbone et de l'eau sont intimement liés. L'importante sécheresse et le rétablissement qui l'a suivi au cours de la période allant de 2001 à 2005 ont entraîné une diminution de 30 à 40 % de la croissance des forêts, de pair avec une importante mortalité. Malgré le retour à des conditions humides en juin 2004, la mortalité a continué de s'accroître durant les années 2004 et 2005, ce qui indique que la sécheresse peut avoir des répercussions régionales importantes sur l'absorption du carbone par le peuplier tremble, effet qui se poursuit après un retour à des précipitations normales.

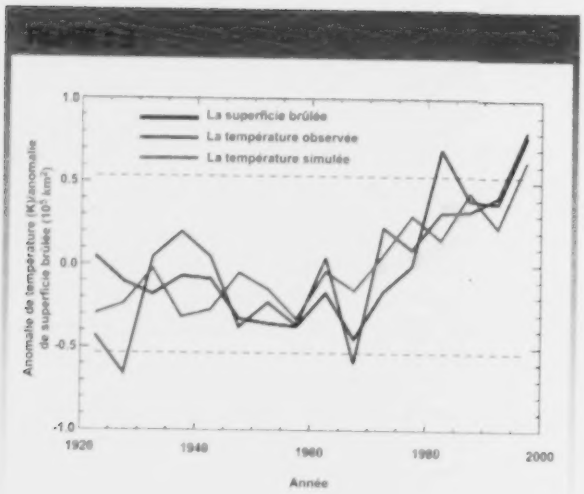
Les mesures des échanges nets de carbone entre l'atmosphère et la forêt montrent que les forêts anciennes sont des puits de carbone faibles à modérés (*figure 3.1*). L'élément principal de contrôle climatique est la température printanière, qui a un effet plus dynamique sur les forêts de feuillus que sur les forêts de conifères. Dans la forêt boréale de feuillus, les printemps chauds favorisent un piégeage accru du carbone en accélérant l'émergence des feuilles. La photosynthèse annuelle est augmentée, mais la respiration demeure inchangée. La PNE annuelle est plus variable dans les forêts de feuillus, où le piégeage du carbone est plus de trois fois plus élevé pendant un printemps chaud que pendant un printemps frais. Dans la forêt boréale de conifères, les températures printanières élevées allongent la période de croissance en accélérant la fonte des neiges au printemps. On voit donc que la PNE réagit rapidement aux changements climatiques. Les résultats de ces études illustrent le caractère hautement sensible de ces forêts aux conditions actuelles de température et d'humidité et montrent que ces facteurs régissent étroitement la mesure dans laquelle une forêt est un puits ou une source de carbone.

À mesure que la recherche évolue, un certain nombre de questions scientifiques sont abordées :

- la variabilité interannuelle du climat, dans le but d'évaluer les répercussions possibles des changements climatiques sur les échanges de carbone, d'eau et d'énergie entre la forêt boréale et l'atmosphère;
- les répercussions des changements climatiques sur la productivité et la santé de la forêt boréale du sud;
- la vérification à l'échelle régionale d'une PNE modélisée sur la base d'une série chronologique de concentrations de CO_2 et d'autres gaz traces;
- l'évaluation des modèles, afin de caractériser les effets de la variabilité interannuelle du climat;
- des estimations améliorées des flux atmosphériques de CO_2; et,
- un aperçu national de la variabilité de la production primaire nette (PPN) et de la relation entre la PPN annuelle et la variabilité interannuelle du climat.

3.2.2 Émissions des forêts canadiennes

Aux termes du protocole de Kyoto, le Canada a l'obligation de déclarer les émissions anthropiques de carbone et peut

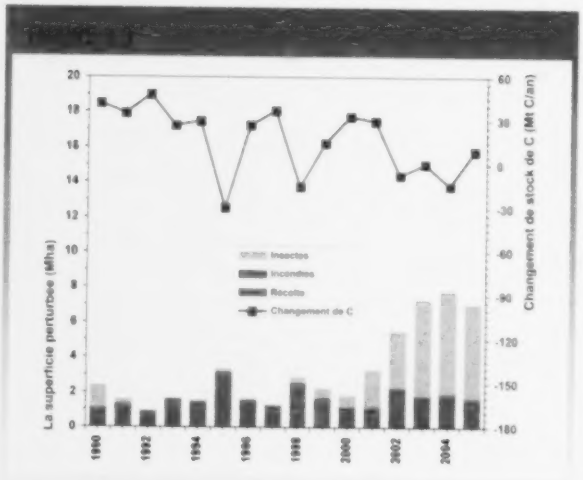


Relation entre la température et la superficie brûlée, 1920-2000.

déclarer les absorptions par les puits liées à l'activité humaine dans les forêts après 1990. Les émissions des forêts, qui à ce jour sont plus ou moins bien décrites et estimées, sont fortement assujetties aux phénomènes stochastiques qui touchent des zones étendues. Ces phénomènes sont les feux de friche et les pullulations d'insectes, mais d'autres phénomènes (moins bien circonscrits) comme le dépérissement des forêts et le déracinement des arbres par le vent accroissent aussi les émissions. Les incendies sont d'importants phénomènes stochastiques qui ne peuvent pas faire l'objet de prévisions; par contre, les pullulations d'insectes suivent un cycle habituellement connu et on peut projeter les émissions qui en découlent. Tant les retards de croissance que la mortalité peuvent être mesurés à l'aide des techniques actuelles de surveillance. Les feux de friche brûlent chaque année en moyenne deux millions d'hectares de terrain forestier mais, d'une année à l'autre, les superficies peuvent varier de 0, 4 à 7,5 millions d'hectares. Les émissions causées par les incendies sont calculées en fonction de la superficie brûlée et de la biomasse utilisée. Les projections concernant la superficie incendiée selon le danger représenté par les conditions forêt-météo dans un climat modifié indiquent qu'il y aura une augmentation allant de 75 à 120 % de la superficie brûlée d'ici la fin du siècle.

La superficie brûlée par les feux de friche est principalement régie par les conditions météorologiques (*figure 3.2*), mais les répercussions de l'activité humaine sont aussi importantes : fragmentation des forêts, augmentation de la densité de population et activités de gestion des forêts. À cause de politiques de gestion passées qui ne tenaient pas compte des incendies, il existe de vastes zones de forêts ayant dépassé le stade de maturité et particulièrement sujettes à de grands incendies difficiles à maîtriser. En Colombie-Britannique, une complication supplémentaire réside dans le fait que les scolytes ont entraîné la mort de grandes étendues de forêt, ce qui a contribué à constituer une réserve de matières combustibles; on sait que ce phénomène est causé en partie par le réchauffement climatique.

Les pullulations d'insectes causent des retards de croissance et une mortalité qui entraînent des émissions sur de vastes superficies, qui couvrent souvent des dizaines de millions d'hectares. L'infestation par le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*) en Colombie-Britannique a causé une mortalité importante qui a eu des répercussions considérables sur les émissions nationales de 1990 à 2005. Les effets de ces perturbations sont évidents : les forêts ont été un puits jusqu'en 2001, année où une augmentation de la mortalité causée par les insectes a entraîné le rejet d'une quantité énorme d'émissions et un bilan du carbone négatif. Cet état de fait a poussé à effectuer



Changements des stocks de carbone dans les forêts canadiennes, 1990-2005.

une analyse des risques en vue de déterminer s'il faut inclure la gestion des forêts dans le cadre de l'article 3.4 du Protocole de Kyoto; le Canada devrait-il choisir d'inclure la gestion des forêts dans les déclarations produites aux fins du Protocole? À cause de la mortalité accrue après 2001, on a estimé qu'il était probable à environ 90 % que la gestion de la forêt soit une source d'émissions, y compris les émissions de gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone, pour la période allant de 2008 à 2012. Les forêts aménagées ont été des puits de carbone au cours de douze des seize dernières années, toutefois, après 2001, la tendance s'est renversée (*figure 3.3*). C'est pour cette raison que la décision a été prise de ne pas inclure les activités de gestion des forêts dans les déclarations d'émissions de GES. Les émissions ont aussi été perturbées par les changements d'affectation des terres : expansion agricole, urbanisation, aménagement de lignes de sondages sismiques et autres activités de déboisement. Toutes ces activités entraînent une augmentation des émissions dont certaines sont en partie compensées par la transformation de terres agricoles abandonnées en terres forestières.

Les grandes quantités de carbone stocké dans le sol forestier, en particulier dans la forêt boréale et la forêt boréale mixte, soulignent la nécessité de mieux comprendre la dynamique du carbone du sol pour prévoir les émissions. Le programme PRDE qui soutient la recherche dans le domaine du carbone du sol a permis aux chercheurs de mieux saisir cette composante du cycle. Les études ont montré que la quantité de carbone dans le sol augmente habituellement avec le temps et que la décomposition de la litière est un processus lent, qui varie selon la région et les espèces en présence. On observe une variation interannuelle notable des émissions, étroitement liée aux températures, ce qui signifie que, si les températures montent, les émissions augmenteront aussi. Les changements de température au cours des dix dernières années nous indiquent que ce processus est déjà en cours. Le réchauffement climatique, les feux de friche et l'exploitation forestière sont des facteurs dont la variation a une incidence marquée sur le processus de décomposition, ce qui se répercute sur la quantité de carbone dans le sol. Les perturbations jouent un rôle majeur dans l'état de puits ou de source de carbone des forêts à cause de la fréquence et de l'étendue des perturbations causées par les incendies ou les pullulations d'insectes. On sait qu'il y a aussi d'importantes réserves de carbone dans les tourbières, mais on dispose de peu d'informations sur les répercussions des feux sur ces sites.

Deux exemples de ces incertitudes concernent les effets des sécheresses à grande échelle et les variations interannuelles du taux de croissance :

- Les forêts boréales de feuillus sont très sensibles à la date du réchauffement printanier comme le montre le rétablissement rapide de la production nette de l'écosystème au printemps ainsi qu'après l'exploitation forestière. À moins d'établir une surveillance adéquate de ces écosystèmes, les prévisions en matière d'absorption et d'émissions par l'écosystème demeureront incertaines.

- À cause de la fluctuation des taux de croissance et de décomposition induite par la variabilité du climat, la variabilité interannuelle du piégeage du carbone est considérable. Cette variabilité est mesurée par l'analyse des anneaux de croissance des arbres qui montre que les taux de croissance varient selon les espèces et les régions, mais aussi au sein d'une même espèce ou région. Il ne semble pas y avoir de tendances à l'échelle nationale selon les analyses effectuées à ce jour. Si les températures changeantes ont une incidence sur la croissance des arbres, la composition de l'atmosphère influe aussi sur la croissance et le développement des arbres. Tant que l'atmosphère continuera de changer, les incertitudes demeureront quant à la croissance et au développement futurs des arbres forestiers.

Les milieux humides emmagasinent du carbone en abondance à cause du faible taux de décomposition; de plus, ils sont plus sensibles aux changements climatiques (particulièrement à l'élévation des températures et aux sécheresses) que les hautes terres avoisinantes. Même s'il est possible d'évaluer les flux de vastes superficies à l'aide d'outils de télédétection, ces méthodes ne tiennent pas compte adéquatement de la topographie complexe propre aux forêts boréales et mixtes. Par conséquent, on comprend encore mal la situation des réservoirs de carbone des zones humides, puisque la topographie influe grandement sur les absorptions et les émissions de dioxyde de carbone. Il y a une forte variation des émissions de dioxyde de carbone en fonction de la topographie, les niveaux maximums se situant dans la zone de transition entre hautes terres et milieux humides. On observe cet effet dans les forêts de feuillus tolérants, mais pas dans les forêts de conifères ou les forêts mixtes.

Pour les périodes d'engagement à venir (après 2012), les décideurs auront besoin de règles mieux adaptées à la situation canadienne en matière de structure des classes d'âge des forêts et de perturbations naturelles. Les règles actuelles n'encouragent pas à entreprendre des actions de gestion pour réduire les émissions, en particulier là où il y a un risque élevé d'émissions abondantes en raison de perturbations à grande échelle.

3.2.3 Rôle des perturbations naturelles et des rétroactions climatiques dans les flux actuels et futurs

Les grandes quantités de carbone stocké dans les écosystèmes forestiers sont sensibles aux perturbations naturelles qui, selon les prévisions, augmenteront à mesure que le climat se modifiera. Environ un tiers du carbone terrestre de la planète se trouve dans la forêt boréale, et un dixième de cette forêt boréale est situé au Canada. Il y a des liens étroits entre le bilan du carbone et les perturbations à grande échelle que sont l'exploitation forestière, les feux de friche et les dommages causés par les insectes, mais les humains ont peu de contrôle sur le bilan net du carbone, puisqu'ils ne peuvent pas limiter les perturbations naturelles. Beaucoup de feux de friche surviennent après quelques journées de temps propice aux incendies, ce qui entraîne inévitablement de grandes pertes. Ce sont donc les perturbations qui déterminent si les forêts sont une source ou un puits, selon la fréquence et l'étendue des dommages causés par les incendies ou les pullulations d'insectes (*Figure 3.4*). Les sources de carbone sont la végétation incendiée et les émissions accrues des sols et du carbone provenant de la décomposition dans les forêts jeunes. Un terrain forestier incendié demeure, jusqu'à cinq ans après l'incendie, une source nette de carbone mais, entre la cinquième et la treizième année, ces mêmes forêts deviennent des puits de carbone, signe d'un rétablissement rapide pour ce qui est du carbone. À terme, les forêts deviennent des puits et le demeurent jusqu'à ce qu'elles arrivent à maturité, si aucune autre perturbation ne survient. Les répercussions de ces feux de friche sur le paysage sont saisissantes; de plus, elles indiquent où, dans l'avenir, le feu agira comme agent de changement dans la forêt boréale.

Alors que les feux sont des phénomènes stochastiques étendus et imprévisibles, les pullulations d'insectes suivent un cours généralement prévisible, du moins là où les changements de population peuvent être suivis. Cette capacité d'assurer un suivi et donc d'établir des prévisions permet de mieux estimer les flux de carbone. Toutefois, dans de nouvelles conditions climatiques, d'une part, les insectes ravageurs que nous connaissons bien risquent de devenir encore plus dommageables et, d'autre part, l'émergence d'insectes auparavant considérés comme inoffensifs conjuguée au risque accru d'invasion par des ravageurs exotiques aura des effets imprévisibles sur des forêts déjà éprouvées par les changements climatiques. Lorsqu'il y a interaction entre les ravageurs et les incendies, le risque de feux de friche est plus grand s'il s'agit de forêts qui ont déjà

FIGURE 3.4

Emplacements des feux de friche couvrant plus de 200 h, 1980–1999. Les polygones ont été aimablement fournis par des organismes canadiens (provinces, territoires, parcs nationaux) et par l'État de l'Alaska.

subi des dommages par les insectes. On s'attend à ce qu'un climat plus chaud et plus sec augmente le risque de dommages causés par les insectes défoliateurs, en particulier la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*), ce qui accroît à son tour le risque d'incendie puisqu'il y a davantage de matières combustibles disponibles sous la forme d'arbres morts ou dépérissants. D'autres défoliateurs ainsi que les scolytes se font aussi plus actifs quand le climat se réchauffe. Le problème des répercussions des maladies sur les forêts et sur les émissions de carbone est préoccupant, mais on dispose de peu de renseignements à ce sujet. Des organismes pathogènes destructeurs ont déjà causé d'importantes pertes dans le passé, et on peut s'attendre à une augmentation de ces pertes si les forêts subissent d'autres formes de stress. Il est possible aussi que l'incidence des dépérissements de forêts à grande échelle ou du déracinement des arbres par le vent à la suite de conditions climatiques anormales soit plus grande, bien que l'on ignore les répercussions de ces phénomènes.

3.3. Quelles sont les options permettant de réduire les émissions ou de renforcer les puits?

3.3.1 Contexte

Outre l'importance d'attirer l'attention sur les risques et les préoccupations soulevés par l'accroissement des sources de GES des forêts, que cet accroissement soit le fait d'activités anthropiques ou de perturbations naturelles, la question de l'amélioration des puits concerne les décideurs, en raison des possibilités de renforcer les puits de carbone et de réduire les pertes dans les forêts. À l'échelle du peuplement, il existe diverses mesures qui peuvent atténuer les émissions de GES et, à court terme, avoir des répercussions limitées sur l'accroissement du carbone, mais qui, à long terme, peuvent avoir des effets plus grands et plus permanents sur la séquestration du carbone. Les effets à long terme sur le carbone dépendent surtout des actions continues qui résultent de changements permanents dans les pratiques de gestion des forêts. Il y a sûrement des risques à vouloir prévoir les effets futurs d'activités actuelles, mais les activités qui se fondent sur les sciences forestières disposent au moins de bonnes données de départ.

Les répercussions socio-économiques des mesures de gestion des forêts comprennent généralement un meilleur approvisionnement en produits du bois découlant d'un accroissement de l'exploitation forestière. Cet état de fait augmenterait, du coup, la quantité de carbone ainsi stocké. Les répercussions socio-économiques varient en fonction des régions; ainsi, une réduction du brûlage dirigé aura des répercussions sur les efforts de reboisement en Colombie-Britannique, alors que la lutte contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette aura le plus d'effets dans l'est du Canada. La lutte chimique contre les infestations de tordeuse et la fertilisation des forêts peuvent augmenter les émissions à court terme, mais elles se traduisent, à long terme, par une augmentation du carbone stocké. La mise en œuvre réussie des actions n'est pas limitée par la technologie ou l'expérience, bien que des contraintes d'infrastructure puissent ralentir la mise en application. L'augmentation possible du carbone stocké grâce à des actions comme la gestion des résidus, la fertilisation et la plantation d'arbres dépend grandement des conditions locales. L'amélioration continue des méthodes durables de gestion forestière, qui repose sur des règlements provinciaux, sur les forces du marché et sur les préférences du public, signifie que d'importantes initiatives gouvernementales seront nécessaires pour qu'il soit possible de renforcer les puits. Pour les actions possibles qui ont des répercussions à long terme, il faudra effectuer une analyse coût-avantage et une analyse du cycle de vie afin d'estimer les émissions totales.

Étant donné que des changements climatiques importants sont déjà inévitables, il est primordial que les décideurs élaborent et mettent en œuvre des stratégies d'adaptation. On s'entend sur la nécessité de promouvoir à la fois l'atténuation et l'adaptation dans le cadre d'une stratégie intégrée; l'adaptation aux répercussions des changements climatiques est nécessaire parce que l'inaction n'est pas une option. Une capacité réduite à gérer les risques limitera les possibilités d'action et fera croître les pertes. Les changements climatiques projetés au cours des prochaines décennies poseront des difficultés majeures pour la gestion de l'écosystème forestier. Par exemple, le boisement augmente la superficie de forêt, les stocks de carbone dans la biomasse, la litière et le sol, ainsi que le potentiel de récolte futur. Plusieurs millions d'hectares seraient disponibles pour le boisement, sous réserve de la concurrence livrée par l'agriculture. Les plans de gestion doivent donc maximiser la capacité d'adaptation des forêts et des communautés qui en dépendent, en même temps que les pratiques tiennent compte des perturbations subies

par les forêts et s'y adaptent, tout en préservant la diversité biologique. Dès que les écosystèmes forestiers dépassent un certain seuil écologique critique, les changements de leur composition peuvent s'accélérer et entraîner des transformations radicales des écosystèmes en très peu de temps. Les stratégies d'adaptation, si elles sont mises en œuvre intelligemment, peuvent influencer le cours de l'évolution de nos forêts.

L'adaptation est définie comme l'ajustement des êtres vivants, des communautés et des pays aux conditions environnementales afin de mener une existence en accord avec ces nouvelles conditions changeantes. Le processus d'adaptation est continuel, qu'il y ait ou non des changements climatiques; et, à mesure que les conditions changent, les politiques et les actions doivent aussi changer si on veut assurer la durabilité. Même si les écosystèmes des forêts s'adaptent par eux-mêmes aux changements climatiques, leur importance pour la société est telle que cette dernière veut influencer l'orientation et la vitesse de cette adaptation, puisqu'elle atténue la vulnérabilité aux changements. Or, les mesures d'adaptations ne sont pas que des gestes à poser dans l'avenir; ce sont des actions qu'il faut entreprendre dès maintenant en prévision des conditions futures. De nombreux changements ont déjà été entrepris dans la gestion des forêts en réaction aux changements climatiques actuels, ce qui signifie que les fondements d'autres mesures d'adaptation sont déjà en place.

Pour ce qui est des feux de friche en tant que perturbation, divers facteurs sont reconnus par les gestionnaires forestiers et les décideurs. Traditionnellement, on a assuré la gestion de forêts dont le régime des feux est modéré et qui présentent un intervalle de récurrence des feux de 100 à 150 ans. En ce moment, les opérations forestières se concentrent sur les forêts septentrionales et boréales, et la gestion des feux doit tenir compte de nouveaux régimes de productivité et de perturbations, de périodes de rotation plus courtes et de feux de friche plus fréquents. Les plans de gestion forestière fondés sur l'inclusion des perturbations naturelles supposent qu'une telle stratégie préserve aussi la biodiversité, la structure du peuplement, la santé de la forêt, l'intégrité du sol et les ressources en eau ainsi que les valeurs économiques qui soutiennent le développement durable. Les forêts aménagées ont une meilleure capacité d'adaptation, parce qu'elles sont plus jeunes et plus accessibles et qu'elles sont planifiées en vue d'une gestion continue. Elles se distinguent aussi des forêts naturelles par le fait que leur structure est plus fragmentée et plus variée en termes d'essences et qu'elles sont par conséquent plus résilientes dans un contexte d'adaptation et de changements climatiques. Il est important de se rappeler qu'il est impossible d'éliminer *tous* les feux, et les gestionnaires doivent donc décider où, quand et comment prévenir les dommages jugés inacceptables pour les êtres vivants et les biens. Il faut donc recourir à un système de zonage plus raffiné, représentant les valeurs commerciales, économiques et sociales, afin de décider si les feux de friche doivent être éteints ou circonscrits, ou s'il faut les laisser se consumer.

3.3.2 Options de gestion forestière pour réduire les émissions et améliorer les puits

3.3.2.1 Gestion des feux de friche

Si, comme prévu, le régime des feux de friche est aggravé par les activités d'exploitation et de gestion passées, les gestionnaires forestiers peuvent mettre en œuvre une ou plusieurs des solutions suivantes :

- la création d'un système de zonage afin de déterminer le degré de réaction;
- l'augmentation de ressources visant l'extinction des incendies pour la protection des biens, des matières ligneuses et de l'habitat faunique;
- l'aménagement de forêts « résistantes au feu », notamment en milieu périurbain; et
- exercer une gestion plus soutenue pour réduire les risques de feux de friche.

3.3.2.2 Réduction des dommages dus aux insectes

Les projections actuelles de l'activité des insectes laissent croire que les pullulations seront plus fréquentes et plus intenses. Les gestionnaires peuvent élargir les programmes de pulvérisation tout en développant des pesticides sans danger pour l'environnement. Toutefois, il s'agit d'une option à court terme. À plus long terme, une gestion des forêts reposant sur des méthodes d'exploitation et de reboisement peut modifier la composition du peuplement, ce qui rendrait la forêt résistante aux insectes, le changement de la composition des essences réduisant les risques. En privilégiant également l'aménagement de jeunes forêts avec des périodes de rotation plus courtes, on peut réduire les risques : en diminuant ainsi l'exposition, on diminue aussi le risque. Dans l'immédiat, les gestionnaires

peuvent procéder au zonage d'une forêt, comme c'est souvent le cas pour la gestion des feux, afin de déterminer quelles zones doivent être protégées.

Un climat différent augmente les possibilités que des insectes bien connus changent de comportement et que de nouvelles espèces envahissantes causent des dommages. Les aménagistes forestiers peuvent recourir à une exploitation sélective et à d'autres méthodes sylvicoles pour réduire les risques et la sensibilité, tout en orientant les activités de recherche sur la lutte contre les organismes nuisibles. Dans le cas des espèces envahissantes de ravageurs, ils doivent améliorer les techniques de détection et d'éradication qui s'appuient sur le cycle de vie de ces ravageurs et sur la manière dont leur biologie reproductive peut être perturbée par un climat changé. On prévoit qu'un climat plus chaud fournira un environnement plus favorable à des organismes pathogènes nuisibles, ce qui se traduira par une augmentation des dommages dus à des maladies du tronc et des racines d'arbres qui subissent déjà un stress à cause d'autres facteurs.

3.3.2.3 Gestion de l'impact des sécheresses

Des sécheresses plus fréquentes et plus longues, lourdes de conséquences pour la santé des forêts, sont une des manifestations les plus répandues de l'évolution du climat. L'exploitation forestière peut réduire encore davantage la rétention des précipitations et de l'eau; il s'ensuit que le déficit accru d'humidité du sol entraîne l'échec ultérieur de la régénération. À court terme, les aménagistes peuvent modifier l'exploitation de manière à préserver les arbres de l'étage dominant et réduire l'évapotranspiration. Une autre option consiste à réduire la récolte annuelle. À moyen terme, il est possible de procéder au reboisement avec des essences/variétés différentes qui s'accommodent d'un degré d'humidité moindre ou de coordonner le reboisement en fonction des phénomènes météorologiques prévus ou des saisons. À plus long terme, les options envisageables sont la gestion des forêts sensibles en tant qu'aires de conservation plutôt que comme zones d'approvisionnement en matières ligneuses, ou encore la sélection d'essences résistantes à la sécheresse aux fins de reboisement.

3.3.2.4 Adaptation au changement climatique

On associe au réchauffement du climat un allongement de la saison de croissance et une meilleure possibilité de croissance des arbres aux latitudes plus nordiques. Ainsi, certaines parties des forêts afficheront des taux de croissance plus élevés, alors que d'autres seront de plus en plus déphasées par rapport à leur milieu, ce qui exercera des pressions sur de vastes superficies de forêts. Une option possible est de choisir, pour le reboisement, des essences mieux adaptées aux nouvelles conditions. Il faudra disposer de données supplémentaires sur les variations subies par des essences forestières moins bien connues, comme le bouleau à papier, le sapin baumier et le peuplier tremble, pour alimenter la base de données actuelle. À court terme, on peut modifier le calendrier de récolte, augmenter le taux de récolte et élaborer des stratégies de gestion pour des territoires forestiers plus petits et différents. Des rotations plus courtes qui favorisent les forêts plus jeunes sont aussi une option permettant de réduire les risques.

Un climat plus chaud modifiera l'utilisation des terres, ce qui aura des répercussions sur les puits de carbone, à mesure que les terres plus nordiques deviendront propices à l'agriculture et perdront de la valeur comme terrain forestier. Cette situation constitue une menace pour les stocks de carbone, car les terres agricoles n'ont pas la capacité de stocker d'aussi grandes quantités de carbone que les terrains forestiers. La mesure qui s'offre aux aménagistes forestiers est de gérer les terres et les forêts davantage en prévision du réchauffement du climat. L'adaptation surviendra naturellement qu'il y ait ou non une gestion active; toutefois, pour maintenir nombre des avantages économiques et sociaux, une gestion plus soutenue et plus active s'imposera.

3.3.2.5 Stockage du carbone dans les produits du bois

Une des mesures d'atténuation facilement mise en place est la rétention prolongée du carbone dans les produits du bois récolté et l'utilisation accrue de ces produits plutôt que de matières riches en fossiles. L'augmentation de l'utilisation de biocombustibles ligneux au lieu de combustibles fossiles pour produire de l'énergie aidera aussi à limiter ou à réduire les émissions. Bon nombre de ces technologies ont atteint leur plein développement et n'attendent plus qu'un changement de politiques pour être mises en application. Les mesures d'adaptation peuvent être conçues et mises en place de manière à profiter d'avantages connexes appréciables en termes de création d'emploi, de production de revenus, de réduction de la pauvreté, de biodiversité, de conservation des bassins hydrographiques et d'approvisionnement en énergie renouvelable et sûre.

3.4 Recherches sur le bilan du carbone forestier au Canada et défis soulevés par les déclarations au Protocole de Kyoto/PRDE.

La dynamique à long terme du carbone des écosystèmes forestiers et la sensibilité de ces derniers à la variabilité et aux changements du climat sont des éléments essentiels aux activités concernant les sources et puits de carbone.. Lorsqu'on a effectué les premières modélisations, il y a une vingtaine d'années, le degré de confiance dans la capacité de prévoir comment la dynamique du carbone réagirait aux changements climatiques était peu élevé. On espérait que la recherche appuyée par le PRDE diminue l'incertitude quant aux impacts sur le puits de carbone des forêts, en améliorant la compréhension des processus biophysiques qui régissent la dynamique du carbone. La mise à disposition d'une base de données intégrée à des groupes de modélisation du bilan du carbone, en vue de valider et d'améliorer les modèles, a été un des principaux aspects de cette initiative.

La réduction des incertitudes inhérentes aux estimations des changements des stocks de carbone nous permettrait de demander des crédits de carbone, que ce soit pour des projets individuels ou à l'échelle de l'ensemble de la forêt aménagée. Des outils de surveillance ont été utilisés pour calculer les changements des stocks de carbone pour la période allant de 1990 à aujourd'hui; ces outils requièrent des renseignements détaillés issus de l'inventaire forestier et des données sur les perturbations naturelles, les changements d'affectation des terres et les activités de gestion forestière. Les outils d'analyse des scénarios peuvent ensuite projeter les changements à venir des stocks de carbone à partir d'hypothèses sur les taux futurs de perturbations, de changements d'affectation des terres et d'activités de gestion forestière. Ces outils aident les gestionnaires et les décideurs à choisir des stratégies appropriées pour renforcer les puits de carbone.

Il est essentiel de comprendre les stocks de carbone et les émissions dans le temps et l'espace pour établir les caractéristiques de l'hétérogénéité spatiale du cycle du carbone dans l'ensemble du paysage boréal et pour comprendre les facteurs climatiques et biophysiques qui régissent la dynamique du carbone dans les forêts boréales. On mesure les échanges nets de carbone entre l'atmosphère et la forêt à partir des données biophysiques recueillies par voie aérienne ou par des tours instrumentées. Les données montrent que les forêts boréales de feuillus sont sensibles au réchauffement printanier, que la production nette de l'écosystème est rétablie rapidement après la récolte et que les cycles du carbone et de l'eau sont intimement liés. Les effets de la variabilité interannuelle du climat sur les bilans du carbone et de l'eau sont inscrits dans une base de données intégrée au niveau du peuplement, utilisée pour valider les modèles des processus écosystémiques. À l'aide de ces données, les scientifiques peuvent évaluer et améliorer les modèles du cycle du carbone à l'échelle nationale et, à terme, élaborer des modèles fondés sur le climat pour analyser la croissance et le rendement. La démonstration de ces effets est un des résultats majeurs obtenus dans le cadre du PRDE.

La recherche sur les émissions dans des régions à topographie variable montre des pics des flux de CO_2 à la surface du sol comparativement aux valeurs dans les zones adjacentes, ce qui laisse supposer une différence entre la production de CO_2 dans les hautes terres et dans les milieux humides. Comme il s'agit de formes de relief communes sur le Bouclier canadien, ne pas prendre en considération ces « points chauds » peut porter à sous-estimer ou surestimer considérablement la quantité de CO_2. Les recherches se poursuivent sur processus de mise à l'échelle nationale de ces effets régionaux ou locaux.

Les répercussions de l'exploitation forestière sur les puits de carbone font aussi l'objet d'études dans le cadre du PRDE. Environ un million d'hectares de forêt est récolté annuellement, soit près de 0,5 % de la superficie de la forêt productive. Les zones exploitées sont des sources de carbone, habituellement pendant moins de dix ans, après quoi elles deviennent des puits. Le rétablissement peut être amélioré si les résidus de récolte sont laissés sur place. La productivité est aussi accrue par un éclaircissage à mi-rotation et par d'autres pratiques sylvicoles.

Les questions d'échelle, d'agrégation des données spatiales et de changements d'affectation des terres sont étudiées à l'aide de méthodes de télédétection. Le Centre canadien de télédétection (CCT) de Ressources naturelles Canada étudie le développement de relations systématiques entre l'âge d'un peuplement et la productivité primaire nette pour les essences forestières les plus importantes, ainsi que les données spatiales nécessaires pour que ces relations soient prises en compte dans des modèles. On a aussi procédé à la classification des cartes de la couverture des terres obtenues grâce à LANDSAT (satellite utilisé pour l'étude des ressources terrestres) et utilisées pour estimer les flux de carbone des forêts, évaluation les superficies brûlées

dans le temps et l'espace et mesurer la couche active de pergélisol au cours du 20e siècle. Ces activités ont été élargies de manière à inclure une méthode semi-automatique de cartographie radar des milieux humides, ainsi que des données obtenues de télédétection optique et des données altimétriques numériques. Ces données combineront ensuite la composition en essences et les perturbations afin de prévoir les émissions. Les sorties seront des cartes du bilan du carbone à des échelles allant de l'unité d'aménagement jusqu'au niveau régional et national.

Le PRDE a soutenu des études sur les processus afin de comprendre pourquoi la dynamique du carbone et les puits changent avec le temps. Les études en milieu contrôlé ont montré que la croissance de jeunes arbres est stimulée par des concentrations accrues de CO_2. Toutefois, dans le cadre des études d'arbres cultivés en plein champ dans des conditions de concentrations accrues de CO_2 et d'ozone troposphérique dans l'air ambiant, aucune augmentation de la croissance n'a été observée. De plus, les insectes et les maladies ont infligé plus de dommages aux arbres exposés qu'aux arbres cultivés en l'absence d'ozone, ce qui ajoute à l'incertitude des prévisions de l'amélioration de la croissance due à des concentrations accrues de CO_2 dans l'atmosphère. Ainsi, ce ne sont pas toutes les recherches qui aboutissent directement à une réduction des incertitudes; dans le cas présent, l'incertitude ajoutée a montré qu'un effet possible de fertilisation était neutralisé par l'augmentation de la pollution par l'ozone.

Les responsables des politiques font appel à des modèles prévisionnels et descriptifs, et à des modèles des processus pour estimer les émissions et les puits et ensuite en établir des projections. Le PRDE et d'autres programmes fédéraux ont participé au financement de la production de divers modèles fondés sur les processus qui examinent les répercussions des changements planétaires sur la dynamique du carbone forestier. Les recherches à l'appui, comme les activités dirigées par le réseau de recherche Fluxnet-Canada, aident aussi à mieux comprendre les facteurs qui perturbent la dynamique du carbone forestier. Ces renseignements, couplés avec les données sur les changements d'affectation des terres survenus depuis 1990 (obtenues par télédétection et coordonnées entre les secteurs d'affectation des terres), augmentent la capacité de prédiction des modèles. On étudie actuellement la sensibilité du bilan national du carbone des forêts afin de mieux estimer les risques et les répercussions liés à l'activité humaine, et ainsi permettre aux responsables des politiques de calculer quelles sont les probabilités que les forêts aménagées soient des puits de carbone. D'ailleurs, cette information est requise par le Comité national des puits forestiers.

Actuellement, les responsables des politiques voient leur champ décisionnel restreint par les contraintes liées à l'analyse de scénarios au-delà des dix ou vingt prochaines années, alors qu'on prévoit que les répercussions des changements à l'échelle mondiale vont s'intensifier. Les modèles climatiques utilisés à l'heure actuelle ne sont pas sensibles aux variations de la croissance qui résultent des fluctuations interannuelles des températures et de l'humidité; par conséquent, ils ne reflètent pas les répercussions des changements climatiques sur le taux de croissance. S'il était possible de repérer ces variations dans les cernes de croissance des arbres, les modèles du carbone seraient mieux étalonnés et validés. Les recherches soutenues par le PRDE sur les variations de la croissance à court terme à partir de l'analyse des cernes de croissance ont montré qu'il existe d'importantes variations, à l'échelle régionale, dans la croissance d'essences boréales largement répandues. À ce jour, les résultats indiquent que la croissance des arbres s'est poursuivie de manière uniforme d'une essence et d'une région à l'autre de 1850 à 1950 mais que, depuis, les régimes de croissance se sont révélés variables tant à l'échelle régionale qu'en ce qui concerne les essences largement répandues. On ignore si cette situation est le reflet des changements météorologiques ou d'une influence humaine directe comme l'exploitation forestière, le morcellement des terres ou les changements d'affectation des terres.

Le modèle MBC-SFC montre que les forêts qui présentaient un bilan de carbone neutre deviendront des sources au cours des quinze prochaines années, alors qu'elles ont été un puits net des années 1950 aux années 1980. Les forêts ont aussi été des sources de carbone pendant les années où la superficie atteinte par les feux de friche a dépassé la superficie brûlée moyenne calculée à long terme. Les pullulations de dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique ont des répercussions de plus en plus importantes, qui commencent à influer sur le bilan du carbone à l'échelle nationale. On projette donc qu'au cours de la dizaine d'années à venir les forêts deviendront des sources de carbone. Ainsi, le bilan du carbone résulte à la fois des variations à long terme de l'absorption du carbone par les forêts et des variations à court terme induites par la température, les pluies et les perturbations autres, toutes indépendantes de la volonté humaine.

Les incertitudes inhérentes à la modélisation des stocks de carbone ont été dans une certaine mesure réduites, en ce sens que l'on dispose de plus de données sur les processus des écosystèmes. La capacité prévisionnelle est ainsi améliorée, ce qui se traduit par une meilleure capacité à négocier des ententes internationales et à recommander des changements dans la gestion des forêts. Certains des progrès réalisés touchent aux effets du climat régional et aux répercussions des changements atmosphériques sur la croissance des arbres ou encore au rétablissement des stocks de carbone après la récolte.

Le degré de confiance dans les résultats obtenus par modélisation ne cesse de s'accroître année après année, à mesure que de nouvelles informations sont intégrées aux bases de données. Il en résulte une confiance accrue dans les estimations et un constat sérieux de l'étendue de la variabilité des systèmes naturels, de l'impact de l'activité humaine et du risque associé à une variabilité croissante du climat. Des améliorations sont apportées aux sources de données complémentaires sur le carbone du sol, l'analyse de phénomènes stochastiques à grande échelle et les changements physiologiques de la végétation en réaction aux changements climatiques. Les recherches menées jusqu'ici ont permis de créer de meilleurs modèles pour décrire les écosystèmes forestiers et leurs réactions aux changements climatiques et atmosphériques et aux phénomènes stochastiques. Un facteur demeure constant : la possibilité que l'incertitude augmente quand on découvrira de nouveaux aspects à des systèmes et à des processus que l'on croyait avoir compris. À mesure que les sorties modélisées deviendront plus précises, les responsables des politiques pourront en tirer des informations plus pertinentes. Le processus est, par la force des choses, continu puisque les politiques varient en fonction d'ententes internationales conclues ou modifiées pour des raisons qui ne sont pas d'ordre scientifique.

3.5 Où en sommes-nous dans l'atteinte des objectifs de la section 6.2.1 du niveau d'objectifs du projet (NOP)?

Les objectifs fixés par le programme PRDE étaient de réduire les incertitudes, d'améliorer l'évaluation des risques et d'élaborer des stratégies possibles pour le renforcement des puits de carbone forestier. Les effets probables du changement planétaire, l'évaluation des risques de fluctuations du carbone forestier et la répartition des variations des stocks entre les effets « naturels » et les causes anthropiques sont à la base des négociations internationales. La nature cruciale de ces renseignements découle de la présence de grandes forêts au Canada et du rôle que le feu et les pullulations d'insectes jouent dans le bilan du carbone. Dans tous les cas, nous sommes parvenus à améliorer notre compréhension de ces dynamiques, ce qui tend à prouver que nous avons fait beaucoup de progrès en vue d'atteindre les objectifs du PRDE. Après sept années de recherches financées par le PRDE, nous avons pu tirer les premières conclusions concernant la dynamique du carbone des forêts. Ainsi, dans

- un climat plus chaud, l'augmentation de la sécheresse dans les provinces des Prairies risque de réduire le couvert forestier et la productivité des forêts;
- pour l'est du Canada, on prévoit des précipitations sans changement ou plus abondantes, couplées avec des températures plus élevées: la croissance et la productivité des forêts devraient donc augmenter;
- il est préférable de laisser les résidus de récolte sur place et de recourir à une fertilisation azotée pour optimiser les stocks de carbone dans le sol;
- on peut maintenant scientifiquement montrer le lien étroit entre le bilan du carbone, l'exploitation forestière et les feux de friche;
- on comprend beaucoup mieux la relation entre l'âge du peuplement et la productivité primaire nette;
- on dispose maintenant de protocoles de mesure pour de nombreux écosystèmes forestiers; cet état de choses permet de créer des modèles plus fiables des puits de carbone forestiers, ce qui renforce les certitudes pour les responsables des politiques.

On s'attend à ce que le changement planétaire ait d'importantes répercussions sur le bilan du carbone forestier, malgré les mesures de gestion forestière. La recherche qui vise à quantifier les régimes de perturbations probables dues au feu et aux pullulations d'insectes dans le cadre de divers scénarios de changements planétaires

ENCADRÉ 1.0

SYSTÈME DE DÉCLARATION DU CANADA

En 2001, le Service canadien des forêts (SCF) du ministère des Ressources naturelles du Canada (RNCan) a constitué une Équipe nationale de comptabilisation du carbone (ECC) qui dirige actuellement le Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts (SNSCPRCF). Ce système, conforme aux exigences formulées dans les Recommandations en matière de bonnes pratiques du GIEC ainsi qu'aux exigences particulières relatives à la comptabilisation et à l'établissement de rapports prescrites par la CCNUCC et par le Protocole de Kyoto, s'appuie sur le Modèle du bilan du carbone pour le secteur forestier canadien (MBC-SFC) financé par le PRDE. Plusieurs versions de ce modèle ont été et sont encore utilisées pour produire des rapports sur les sources et les puits situés au Canada.

L'ECC, de concert avec des chercheurs de RNCan, du ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, du ministère de l'Environnement, d'organismes provinciaux de gestion des ressources et d'universités, a élaboré des outils de comptabilisation du carbone qui peuvent être appliqués aux échelles nationale, régionale, opérationnelle et du peuplement.

L'ECC a mis au point un système opérationnel national afin d'évaluer les émissions de carbone annuelles dues aux feux de friche dans le cadre du SNSCPRCF appuyé par le PRDE. En plus de disposer de ressources destinées à la mise en œuvre opérationnelle du SNSCPRCF, il est important de renouveler et de soutenir le financement afin de continuer à améliorer les bases scientifiques des estimations des puits forestiers. Le Canada est reconnu à l'échelle internationale pour ses recherches poussées sur le cycle du carbone forestier, pour l'élaboration de programmes de surveillance par télédétection et pour l'intégration de données provenant de diverses sources dans des outils de comptabilisation du carbone forestier.

permettra d'améliorer les projections. La question de la vérification des puits forestiers qui ont été déclarés est importante du point de vue tant de l'engagement que des négociations. Les renseignements qu'on utilise en ce moment se fondent sur différentes sources, en particulier sur les caractéristiques et la dynamique des forêts, soit des renseignements qui n'étaient pas disponibles avant l'instauration du programme PRDE. On sait que la variabilité interannuelle de la croissance des arbres a des répercussions directes sur la dynamique du carbone par l'action de l'humidité disponible et de la température. Elle peut être mesurée directement en utilisant les données sur les variations des cernes de croissance des arbres, données qui sont ensuite utilisées pour étalonner et valider directement les modèles de croissance. Les données ont révélé des variations à court terme considérables de la croissance d'une région à l'autre, d'une essence à l'autre et entre les essences dans une même région, ce qui accroît la fiabilité des estimations du carbone forestier et des émissions annuelles.

Les informations à base scientifique sont utilisées pour appuyer l'élaboration de politiques rèlatives aux négociations et aux exigences en matière de rapport, aux termes des articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto sur le boisement, le reboisement et le déboisement des forêts aménagées. Des questions comme la réduction des incertitudes et la quantification des répercussions des perturbations dans les forêts sont cruciales pour les responsables des politiques; c'est dans cette optique que des programmes comme le PRDE se révèlent si utiles. Grâce à ce dernier, il a été possible de réaliser des progrès marqués dans les domaines suivants :

- la distinction entre les effets naturels et indirects antérieurs à 1990 et les effets anthropiques directs survenus après 1990;
- les projections concernant les conditions relatives aux feux et aux pullulations d'insectes, pour les évaluations des risques à l'horizon des 30 prochaines années;
- l'accumulation/la décomposition du carbone dans le sol dans le cadre de diverses pratiques de gestion forestière;
- la compréhension du potentiel de stockage du carbone dans les tourbières;
- la compréhension des processus des écosystèmes forestiers; et
- l'efficience/l'exactitude des programmes d'échantillonnage et de surveillance qui servent à vérifier

Références

Amiro, B.D., Barr, A.G., Black, T.A. *et al.*, 2004. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* (sous presse).

Amiro, B.D., Logan, K.A., Wotton, B.M. *et al.*, 2004. Fire weather index system components of large fires in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire* 13: 391-400.

Apps, M.J., Bernier, P. et Bhatti, J.S. 2005. Forests in the Global Carbon Cycle: Implications of Climate Change. Pp 175-200. In: J.S. Bhatti, R. Lal, M.J. Apps, et M.A. Price, (dir.). Climate Change and Managed Ecosystems. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.

Barr, A.G., Black, T.A., Hogg, E.H. Climatic controls on the carbon and water budgets of a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, FLUXNET special issue (sous presse).

Bergeron, Y., Flannigan, M., Gauthier, S., Leduc, A. et Lefort, P. 2004. Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: implications for sustainable forest management. *Ambio*. 33:356-360.

Bhatti, J.S., Apps, M.J. et Lal, R. 2005. Anthropogenic Changes and the Global Carbon Cycle. Pp 71-92. In: J.S. Bhatti, R. Lal, M.J. Apps, et M.A. Price, (dir.) Climate Change and Managed Ecosystems. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.

Bhatti, J.S., Apps, M.J. et Lal, R. 2005. Interaction between Climate Change and Greenhouse Gas Emissions from Managed Ecosystems in Canada. Pp 3-15. In: J.S. Bhatti, R. Lal, M.J. Apps, et M.A. Price, (dir.). Climate Change and Managed Ecosystems. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.

Bhatti, J.S., Errington, R.C., Bauer, I.E. et Hurdle, P.A., 2006. Carbon stock trends along upland-peatland transitional forest ecosystems in Central Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* (sous presse).

Candau, J.-N. et Fleming, & R.A. 2005. Landscape-scale spatial distribution of spruce budworm defoliation in relation to bioclimatic conditions. *Can. J. For. Res.* (sous presse).

Chen, W., 2004. Tree size distribution functions of four boreal forest types for biomass mapping. *Forest Science*, 50:436-449.

Chen , W., Pavlic, G. , Zhang, Q. *et al.*, Satellite Observation-based Assessment of Canadian Forest Carbon Cycle.

Chen, W., Q. Zhang Q., J. Cihlar, J. Bauhus, D.T. Price, 2004. Estimating fine-root biomass and production of boreal and cool temperate forests using aboveground measurements: A new approach. *Plant and Soil*, 265: 31-46.

Coursolle, C., Margolis, H.A., Barr, A.G. *et al.*, Late summer carbon fluxes from Canadian forests and peatlands along an east-west continental transect. *Canadian Journal of Forest Research* (sous presse).

Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D. *et al.*, 2004. Future area burned in Canada. *Climatic Change* (sous presse).

Gillett, N. P., Weaver, A. J., Zwiers, F. W. et Flannigan, M. D. 2004. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophys. Res. Lett.*, 31. L18211, doi:10.1029/2004GL020876.

Grant, R.F., Arain, A., Arora, V. *et al.*, 2005. Modelling high temperature effects on CO_2 and energy exchange in temperate and boreal coniferous forests. *Ecological Modelling* 188: 217-252.

Grant, R.F., Zhang, Y., Yuan, F. *et al.*, 2006. Modelling water stress effects on CO_2 and energy exchange in temperate and boreal deciduous forests. *Ecological Modelling*. 196: 289-312.

Hogg, E.H., et Bernier, P.Y. 2005. Climate change impacts on drought-prone forests in western Canada. *Forestry Chronicle* 81: 675-682.

Hogg, E.H., Brandt, J.P., et Kochtubajda, B. 2005. Factors affecting interannual variation in growth of western Canadian aspen forests during 1951-2000. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 610-622.

Ju, W., Chen, J.M., Black, T.A. *et al.*, 2006. Hydrological Effects on Carbon Cycles of Canada's Forests and Wetlands. *Tellus* B, 58: 16-30.

Karnosky, D.F., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., *et al.*, 2005. Scaling ozone responses of forest trees to the ecosystem level in a changing climate. *Plant Cell and Environment* (sous presse).

Karnosky, D.F., Long, S., Taylor, G. *et al.*, 2004. Rising atmospheric CO_2 extends growing season in forest and crop species. *Nature* (sous presse).

Kurz, W.A. et Apps, M.J. 2006. Developing Canada's National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System to Meet the Reporting Requirements of the Kyoto Protocol. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(1): 33-43.

Larocque, G.R., Boutin, R., Paré, D. *et al.*, 2006. Assessing a new soil carbon model to simulate the effect of temperature increase on the soil carbon cycle in three eastern Canadian forest types characterized by different climatic conditions. *Can. J. Soil Sci.*86:187-202.

Larocque, G.R., Boutin, R., Paré, D. *et al.*, Modelling the effect of temperature increase on the soil carbon cycle in three eastern Canadian forest types characterized by different climatic conditions. *Can J. Soil Sci.* (sous presse).

Liu, J., Price, D.T. et Chen, J.M. 2005. Nitrogen controls on ecosystem carbon sequestration: a model implementation and application to Saskatchewan, Canada. *Ecological Modelling* (sous presse).

Moore, T.R., Trofymow, J.A., Siltanen *et al.*, 2005. Patterns of decomposition and carbon, nitrogen and phosphorus dynamics of litter in upland forest and peatland sites, central Canada. *CJFR* 35:133-142.

Moore T.R., Trofymow, J.A., Prescott, C. *et al.*, 2006. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus release from decomposing foliar litter in Canadian forests. *Ecosystems* 189:46-62.

Neilson, E.T., D.A. MacLean, P.A. Arp, F-R. Meng, C.P-A., Bourque, J.S. Bhatti- 2006. Modelling carbon sequestration with CO_2 Fix and a timber supply model for forest management planning. *Canadian Journal of Soil Science*. 86:219-233.

Palosuo, T., Liski, J., Trofymow, J.A. et Titus, B.D. 2005. Litter decomposition affected by climate and litter quality – testing the Yasso model with litterbag data from the Canadian Intersite Decomposition Experiment. *Ecol. Modelling* 189:183-198.

Paré, D. Boutin, R., Larocque, G. et Raulier, F. 2006. Effect of temperature on soil organic matter decomposition in three forest biomes of eastern Canada. *Can J. Soil Sci.* 86: 247-256.

Percy, K.E., Nosal, M., Dann, T., Hielman, W. et Karnosky, D.F. 2005. Developing stand-level, standards-based ozone dose response functions for aspen and birch. Invited paper at 37th Air Pollution Workshop "Relating Atmospheric Source Apportionment to Vegetation Effects: Establishing Cause and Effect Relationships." Banff, April 25-28, 2005. *Elsevier Environmental Science series* (Book Chapitre - sous presse).

Preston, C.M., Trofymow, J.A. *et al.*, 2000. Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests. *Can. J. Bot.* 78:1269-1287.

Preston, C.M., Bhatti, J.S., Flanagan, L.B. et Norris, C. Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the Canadian Boreal Forest Transect Case Study. *Climatic Change* (sous presse).

Shaw, C., Oleg Chertov, Alexander Komarov, Jagtar Bhatti, Marina Nadporozskaya, Michael Apps, Sergey Bykhovets et Alexey Mikhailov Application of the forest ecosystem model EFIMOD 2 to jack pine along the Boreal Forest Transect Case Study. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse).

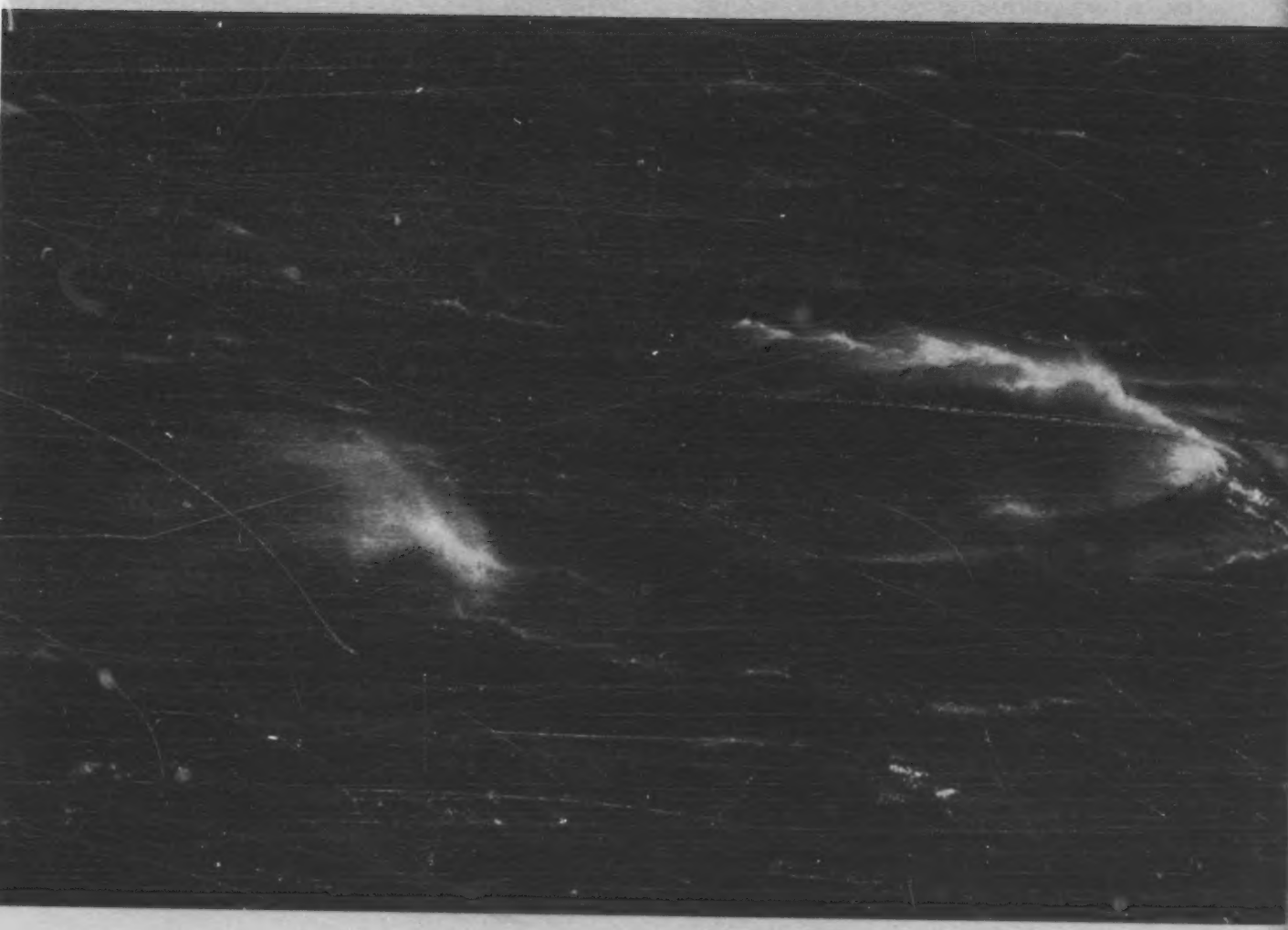
Trofymow, J.A., Moore, T.R., Titus, B. *et al.*, 2002. Rates of litter decomposition over six years in Canadian forests: Influence of litter quality and climate. *CJFR.* 32: 789-804.

Trofymow, J.A., Moore, T. *et al.*, 2003. Climatic controls on litter decomposition rates in Canadian forests. CCAF Project A238 Final Report.

Trofymow, J.A. et Smyth, C. 2006. Decreasing uncertainty in Canada's estimates of forest soil C sources and sinks (CBM-CFS) through use of long-term data from CIDET. Carbon Accounting Team workshop. Victoria, B.C.

Zhang, C.F.; Meng, F.-R.; Trofymow, J.A.; Arp, P.A. 2007. Modeling mass and nitrogen remaining in litterbags for Canadian forest and climate conditions. *Canadian Journal of Soil Science* 87: 413-432.

Zhang, Y., Chen, W., Smith, S.L. *et al.*, 2005. Soil temperature in Canada during the 20th century: complex responses to atmospheric climate change. *J. Geophys. Res.*, 110, D03112, doi:10.1029/2004JD004910.



CHAPITRE 4

Améliorer les puits biologiques des océans : est-ce faisable?

Auteur coordonnateur | **L. Braithwaite**

Auteur principal | **F. Whitney**

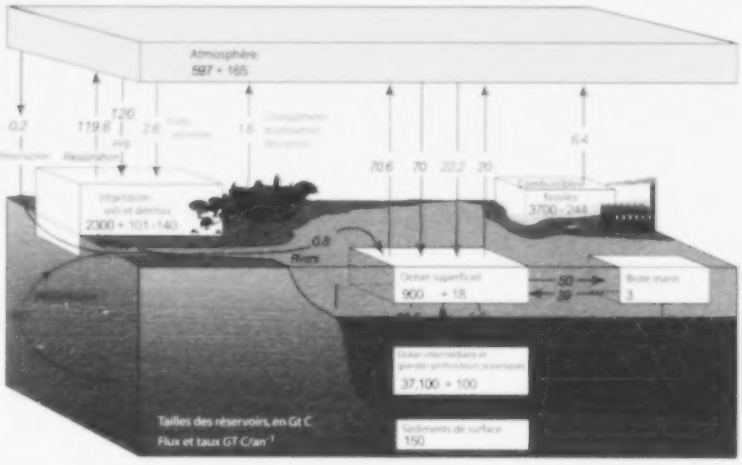
4.1 Introduction

Les océans, qui couvrent 70 % de la surface de la Terre et descendent jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur, constituent un énorme puits pour le dioxyde de carbone (CO_2), le principal *gaz à effet de serre* (GES). À mesure que les activités humaines font monter les niveaux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère de la planète, la capacité des océans à les absorber devient un facteur dominant pour prédire les tendances à venir du réchauffement au Canada, dans les trois océans qui le bordent, et sur l'ensemble de la planète. La plupart de nos enregistrements instrumentaux indiquent en effet clairement qu'il y a eu un réchauffement au cours du dernier siècle. Ce réchauffement a été particulièrement rapide en Alaska et dans le nord du Canada, où les températures ont monté de plus de 2 °C depuis 1970 (GIEC, 2007a).

Le réchauffement de l'océan n'est pas seulement un symptôme de l'augmentation des concentrations atmosphériques de GES; c'est également une perturbation qui influe sur la circulation océanique. Par exemple, l'augmentation de la stratification des couches supérieures de l'océan entraîne un affaiblissement des échanges gazeux entre l'océan et l'atmosphère, ce qui constitue un danger pour les écosystèmes dont l'existence repose sur l'oxygène transporté de l'atmosphère vers l'intérieur de océan. Cette altération du déplacement de la chaleur, de l'eau douce, des nutriments et des gaz au sein des océans a entre autres pour conséquence des impacts sur les climats régionaux, des changements de la productivité de l'océan, des modifications des écosystèmes et des pertes d'habitat pour les organismes marins.

Comme on l'a indiqué au chapitre 1, environ le tiers du CO_2 émis par la combustion de combustibles fossiles est absorbé par les océans (*fig. 4.1*). Dans l'Atlantique Nord, les eaux de surface sont parfois assez denses pour s'enfoncer dans l'océan profond, où elles s'intègrent à la circulation abyssale de l'océan planétaire. Dans le Pacifique subarctique, une région d'échange gazeux située près de la côte de l'Asie transporte aussi des gaz extraits de l'atmosphère, mais seulement jusqu'à des profondeurs intermédiaires, où ils sont isolés de l'atmosphère pendant parfois plusieurs décennies. À l'arrivée du printemps, le dioxyde de carbone est fixé dans la matière organique lors de la photosynthèse et dans la matière inorganique des coquilles par un bon nombre d'organismes. Une grande partie de ces matières est utilisée et reminéralisée dans les couches peu profondes de l'océan. Cependant, une certaine partie des déchets s'enfonce dans l'océan profond et dans les sédiments océaniques, où elle est isolée de l'atmosphère pendant des périodes allant des décennies aux millénaires. Le carbone est ainsi stocké depuis les temps géologiques. Les gros dépôts de carbone dans les sédiments océaniques (et dans les masses terrestres continentales) sont généralement stables. Cependant, une partie d'entre eux peut être

FIGURE 4.1



Cycle mondial du (dioxyde de) carbone dans les années 1990, montrant la taille des réservoirs en Gt C (boîtes) et les flux annuels moyens (flèches) en Gt C an $^{-1}$: valeurs « naturelles » préindustrielles en noir et « anthropiques » en rouge (GIEC, 2007a).

mobilisée à mesure que les océans se réchauffent et deviennent plus acides sous l'effet des hausses des concentrations de CO_2. La libération du carbone stocké dans les carbonates et les dépôts congelés de méthane est d'ailleurs depuis peu un sujet de préoccupation.

Prévoir comment les océans vont évoluer dans les décennies à venir présente un défi majeur pour les modélisateurs. Leurs résultats, si incertains qu'ils puissent être, fournissent cependant des informations dont les sociétés, les gouvernements, les industries, les scientifiques et les citoyens ont besoin pour se préparer aux effets du réchauffement planétaire.

Les activités de modélisation du MPO qui visent à régler ce problème ont grandement bénéficié de la participation de scientifiques engagés dans des programmes tels que SOLAS (étude de l'océan superficiel et de la basse atmosphère). Le financement assuré par le Programme interministériel de recherche et d'exploitation énergétiques (PRDE) a permis aux scientifiques du MPO de contribuer aux grandes expériences entreprises par le volet canadien de SOLAS. Ces collaborations présentent des avantages immenses pour le MPO et d'autres ministères, entre autres des améliorations essentielles des modèles utilisés pour prévoir les impacts du réchauffement planétaire. Un des projets de SOLAS a testé l'hypothèse qu'un enrichissement en fer ferait augmenter la productivité du Pacifique subarctique, et donc le taux de stockage du carbone dans cette région. Cette importante expérience (qui a mobilisé trois navires et plusieurs millions de dollars en tout) a révélé qu'il n'est pas facile de manipuler l'océan pour augmenter son absorption de CO_2. La baisse substantielle des nutriments et des modifications fortes et rapides des populations de plancton donnent à penser que ces interventions perturberaient considérablement des écosystèmes subarctiques entiers.

On trouvera dans le présent chapitre un examen des activités et les résultats des recherches connexes menées par le MPO avec l'aide du PON 6.2.1 du PRDE (amélioration des puits de gaz à effet de serre, APGES). L'examen commence par un aperçu de l'état actuel de la compréhension issue de ces recherches. Les sections suivantes donnent plus de détails sur diverses activités concernant la surveillance, les processus et la modélisation. Nombre de ces résultats ont été utilisés comme base scientifique pour les conclusions récemment présentées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son quatrième rapport d'évaluation sur la science du changement climatique, en particulier pour le chapitre 7 du rapport du Groupe de travail I sur les éléments scientifiques du changement climatique. Ken Denman, du MPO, était l'auteur principal de ce chapitre, et Allyn Clarke faisait partie des réviseurs.

La revue des activités du MPO appuyées par le PRDE mettra en lumière les résultats concernant les grands processus de transport du carbone.

Dans les 15 dernières années, les études océanographiques ont de plus en plus pris la forme de grands efforts coopératifs mettant à contribution des communautés de chercheurs et leur accès à des ressources. Au début des années 1990, l'Expérience sur la circulation océanique mondiale (WOCE) a entrepris un relevé de la totalité de

l'océan mondial pour réunir un ensemble de données cohérent qui permette de faire progresser la compréhension de la circulation océanique et de son transport de chaleur, de nutriments, de gaz et d'eau douce. Un volet essentiel de WOCE était la collecte de données sur l'oxygène, le dioxyde de carbone, les CFC (chlorofluorocarbures) et autres traceurs, en vue de mieux comprendre la capacité de l'océan à stocker les gaz atmosphériques. Sur la même période que WOCE (1990-1997), l'Étude conjointe sur les flux océaniques mondiaux (JGOFS) a entrepris de mesurer la variabilité interannuelle du transport du carbone (et d'autres matières biogéniques) à un certain nombre de sites répartis sur la planète. Après JGOFS est venu GLOBEC (Dynamique des écosystèmes océaniques mondiaux), un programme visant à mieux comprendre les productivités d'écosystèmes régionaux. Plus récemment, SOLAS a permis à de nombreux scientifiques canadiens spécialistes de l'océan et de l'atmosphère d'étudier les échanges de chaleur, d'humidité et de gaz entre la mer et l'air. Toutes ces initiatives mondiales avaient pour but une meilleure compréhension du rôle joué par les océans pour modérer le climat. Par l'intermédiaire de ces vastes programmes, le financement du PRDE a appuyé des volets, petits mais essentiels, de la recherche.

Dans cette situation, comment discerner l'importance des contributions du PRDE à ces divers programmes? Cela ne sera certes pas facile. Le succès de tous ces programmes était tributaire d'un accès aux navires du MPO et à ses ressources en matière de recherche, ainsi que de l'engagement enthousiaste des étudiants et professeurs d'universités. La présente évaluation des succès du programme Amélioration des puits de gaz à effet de serre (APGES) du PRDE consistera donc en un examen des principales conclusions atteintes par les scientifiques du MPO dans les dix dernières années ou plus. Toute l'information présentée aura été appuyée en partie par le PRDE. La matière du rapport provient de présentations faites à l'atelier du PRDE tenu à Ottawa en février 2007, et de divers rapports du PRDE. Des discussions tenteront d'expliquer comment nous avons composé avec les objectifs énoncés dans le plan APGES 2000-2005, et où figuraient 6 buts des recherches sur les océans :

- recueillir, dans le nord-ouest de l'Atlantique et le nord-est du Pacifique, les observations des cycles du carbone nécessaires pour élaborer et évaluer les modèles du cycle océanique du carbone qui seraient utilisés afin d'évaluer la séquestration du CO_2;
- élaborer, pour la séquestration naturelle de CO_2 atmosphérique dans les eaux adjacentes au Canada, des modèles qui intègrent les principaux processus chimiques, biologiques et physiques;
- élaborer des modèles connexes de l'augmentation de la séquestration du CO_2 par fertilisation délibérée de certaines régions de l'océan, et les évaluer à la lumière des observations existantes, issues d'expériences déjà menées dans le Pacifique équatorial et l'océan Austral;
- participer à une expérience internationale de fertilisation délibérée par le fer dans le nord-est du Pacifique (station océanique P) en utilisant des modèles pour concevoir l'expérience, la mener et synthétiser les observations;
- raffiner notre capacité de modéliser et de surveiller les grands puits océaniques de carbone dans les eaux adjacentes au Canada afin de faire d'importantes contributions à l'évaluation de la séquestration de GES;
- fournir une évaluation scientifique acceptable à l'échelle internationale des niveaux atteints, de la faisabilité et des coûts possibles, et des risques environnementaux qui accompagnent la séquestration océanique du carbone par fertilisation délibérée de régions océaniques bordant le Canada.

4.2 Le rôle des océans nordiques comme sources et puits de gaz à effet de serre

Pour le rapport du GIEC intitulé *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (IPCC 2007a), *« les augmentations des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO_2) et autres gaz à effet de serre survenues au cours de la période industrielle sont dues à des activités humaines. En fait, l'augmentation observée des concentrations atmosphériques de CO_2 ne révèle pas la totalité des émissions humaines, puisqu'elle ne correspond qu'à 55 % du CO_2 libéré par des activités humaines depuis 1959. Le reste a été absorbé par des végétaux terrestres et par les océans. »*

Les recherches menées par le MPO sur les GES tendent à porter sur la séquestration océanique du CO_2, le gaz responsable d'environ 70 % du réchauffement planétaire observé, plutôt que sur son rôle en tant que producteur ou

consommateur d'autres gaz, comme le méthane et l'oxyde de diazote. Cette situation est due en grande partie au fait que le dioxyde de carbone est un GES de relativement longue durée de vie tant dans l'atmosphère que dans l'océan, qu'il a été mesuré lors de relevés exhaustifs tels que WOCE et que ses voies de transport dans les océans sont bien connues. On sait beaucoup moins de choses sur le CH_4 (méthane) et sur le N_2O (oxyde de diazote), si ce n'est qu'il y a dans les océans des points chauds où ils sont produits et que leur temps de renouvellement est assez court. C'est pourquoi le flux du carbone a aussi fait l'objet de la majeure partie des recherches du MPO financées par le PON 6.2.1 du PRDE.

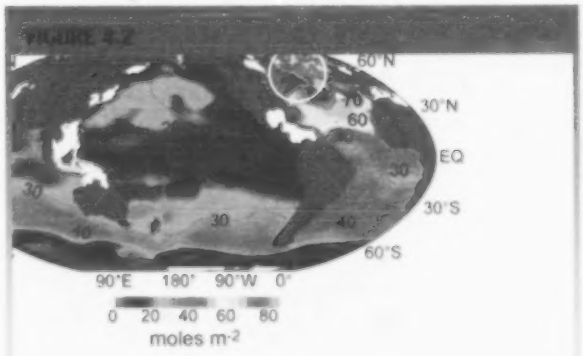
La figure 4.1 ci-dessus montre la taille relative des puits de carbone sur la Terre. C'est l'océan profond qui est de loin le plus important, et il continue à accumuler le carbone anthropique mobilisé par l'homme en raison de son utilisation des combustibles fossiles, des terres et des forêts. Des estimations améliorées de l'absorption par l'océan (2,2 Gt C an^{-1}) donnent à penser que ce taux a peu changé entre les années 1990 et le début des années 2000. Selon les modèles, toutefois, la fraction de CO_2 anthropique stockée dans les océans va baisser à mesure que monteront les niveaux atmosphériques de CO_2. Avec le réchauffement des océans, leurs eaux de surface deviendront plus légères, ce qui fera baisser la production hivernale d'eaux de surface denses qui pourraient s'enfoncer dans l'océan profond. Cet état de choses touchera surtout le nord de l'Atlantique, où prend place la plus grande partie de la séquestration océanique de CO_2 anthropique (*figure 4.2*). De plus, la réduction du brassage fera baisser la quantité de nutriments remontant des profondeurs intermédiaires vers la surface de l'océan, comme on l'a observé dans le Pacifique subarctique. Il s'ensuivra une réduction de la croissance du phytoplancton et donc de l'exportation biologique de carbone de la surface vers les eaux plus profondes.

Les recherches sur les puits océaniques menées par le Canada ont été ciblées sur les trois océans nordiques qui le bordent. Leurs activités et résultats sont discutés ci-après.

4.2.1 Flux de carbone dans les régions de l'Atlantique Nord et de l'Arctique

4.2.1.1 Flux de CID dans la mer du Labrador.

L'eau profonde nord-est-atlantique (EPNEA) et l'eau de déversement du détroit du Danemark (EDDD), avec l'eau de la mer du Labrador (EML), composent la branche inférieure du « tapis roulant » de l'océan mondial (*figure 4.3*). Dans ces régions, la formation d'eaux denses (froides et salées) en hiver crée un mouvement de descente qui transporte de grands volumes d'eau de la surface de l'océan vers ses régions profondes. Comme les gaz atmosphériques sont adsorbés dans les eaux de surface froides de l'Atlantique Nord, ce processus de formation d'eau profonde devient une voie majeure de transport des gaz de l'atmosphère dans les eaux de l'océan profond, où ils restent jusqu'à ce que le lent déplacement de la circulation thermohaline les ramène à la surface quelque 1000 ans plus tard, dans d'autres régions de l'océan qui connaissent des remontées.

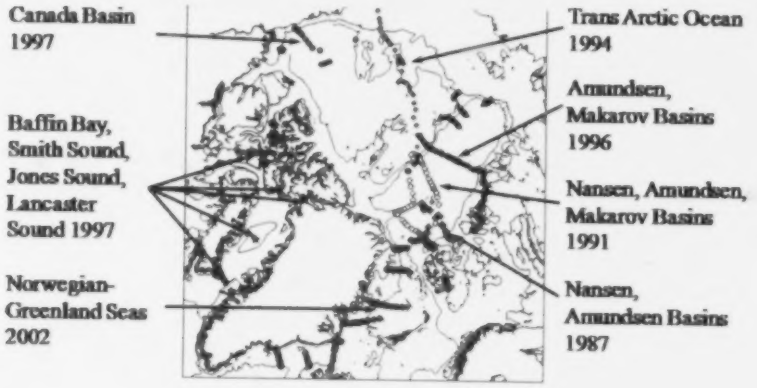


Stockage du carbone anthropique dans nos océans, d'après Sabine *et al.*, (2004). Environ 48 % de toutes les émissions dues aux combustibles fossiles se sont retrouvées dans l'océan, ce qui représente un tiers de son potentiel de stockage du CO_2. Les cercles définissent les zones activement étudiées par le MPO.

La grande circulation thermohaline de l'océan mondial, régie par la formation d'eaux froides et salées dans l'Atlantique Nord.

FIGURE 4.4

Expéditions dans l'océan Arctique, 1987-2002.



Le rôle joué par la mer du Labrador dans ce processus est une cible majeure des recherches du MPO sur les puits de carbone. Une partie des efforts vise à mieux comprendre le transport de carbone inorganique dissous (CID), ce qui inclut le CO_2 sous toutes ses formes chimiques présent dans l'eau de mer, ainsi que l'alcalinité. Comme la contribution anthropique aux très vastes réservoirs naturels de CID est relativement faible et donc difficile à déceler, les chercheurs s'intéressent également aux distributions océaniques des chlorofluorocarbures (CFC) pour retracer l'absorption et le transport de CO_2 anthropique. La fabrication des CFC remonte au milieu du siècle dernier, et leurs concentrations atmosphériques ont augmenté jusqu'à ce que le Protocole de Montréal en freine l'utilisation et le rejet. Comme la concentration des diverses formes de CFC a proportionnellement changé avec leurs temps de séjour dans l'atmosphère, ces rapports sont utiles pour déterminer à quand remonte le dernier contact des eaux océaniques avec l'atmosphère.

Ces études sur les traceurs menées dans la mer du Labrador ont donné aux chercheurs une idée des processus qui régissent la variabilité du stockage principal à long terme dans l'océan. Elles sont en outre complétées par celles effectuées dans le Pacifique Nord, où une remontée à long terme ramène l'eau de l'océan profond, avec le CO_2 qu'elle contient, en contact avec l'atmosphère. Dans les vingt dernières années, ces études ont aidé à quantifier les stocks naturels et anthropiques de CO_2 et leurs flux entre l'atmosphère et l'océan, et permis de mieux comprendre les mécanismes qui déterminent la variabilité des flux de CO_2 en réponse à des changements du climat.

Les relevés effectués par le MPO dans la mer du Labrador depuis une quinzaine d'années fournissent la plus longue série chronologique de mesures du CID et de traceurs transitoires dans l'Atlantique Nord (*figure 4.4*), et certaines des meilleures indications des changements subis par l'océan en réponse au climat (on discutera à la section 4.5 des changements des écosystèmes). Les mesures chimiques connexes permettent en outre de faire la distinction entre les processus physiques et les processus biologiques de séquestration du carbone. Les résultats montrent que 1,9 +/- 0,4 Gt de C anthropique sont présentement stockées dans la mer du Labrador. Ce stock représente 6,4 % du total pour l'Atlantique, même si la mer du Labrador ne constitue que 3,6 % du volume de cet océan. Sur une base annuelle, la mer du Labrador absorbe jusqu'à 0,06 Gt de C du CO_2 anthropique, mais ce taux, qui dépend de la profondeur de la ventilation en hiver, est très variable.

La *figure 4.5* présente un exemple d'un tel relevé effectué en 1997. On voit que les niveaux de carbone anthropique dans les eaux profondes de la mer du Labrador se situaient entre 30 et 50 µmol kg^{-1}. On trouvait des concentrations de C anthropique plus faibles entre environ 2000 et 3000 m, des eaux dont la dernière ventilation à la surface remontait à environ 12 ans. Toutefois, des concentrations plus élevées étaient observées près du fond, là où les eaux semblent avoir été ventilées plus récemment (5-7 ans).

consommateur d'autres gaz, comme le méthane et l'oxyde de diazote. Cette situation est due en grande partie au fait que le dioxyde de carbone est un GES de relativement longue durée de vie tant dans l'atmosphère que dans l'océan, qu'il a été mesuré lors de relevés exhaustifs tels que WOCE et que ses voies de transport dans les océans sont bien connues. On sait beaucoup moins de choses sur le CH_4 (méthane) et sur le N_2O (oxyde de diazote), si ce n'est qu'il y a dans les océans des points chauds où ils sont produits et que leur temps de renouvellement est assez court. C'est pourquoi le flux du carbone a aussi fait l'objet de la majeure partie des recherches du MPO financées par le PON 6.2.1 du PRDE.

La figure 4.1 ci-dessus montre la taille relative des puits de carbone sur la Terre. C'est l'océan profond qui est de loin le plus important, et il continue à accumuler le carbone anthropique mobilisé par l'homme en raison de son utilisation des combustibles fossiles, des terres et des forêts. Des estimations améliorées de l'absorption par l'océan (2,2 Gt C an^{-1}) donnent à penser que ce taux a peu changé entre les années 1990 et le début des années 2000. Selon les modèles, toutefois, la fraction de CO_2 anthropique stockée dans les océans va baisser à mesure que monteront les niveaux atmosphériques de CO_2. Avec le réchauffement des océans, leurs eaux de surface deviendront plus légères, ce qui fera baisser la production hivernale d'eaux de surface denses qui pourraient s'enfoncer dans l'océan profond. Cet état de choses touchera surtout le nord de l'Atlantique, où prend place la plus grande partie de la séquestration océanique de CO_2 anthropique (*figure 1.2*). De plus, la réduction du brassage fera baisser la quantité de nutriments remontant des profondeurs intermédiaires vers la surface de l'océan, comme on l'a observé dans le Pacifique subarctique. Il s'ensuivra une réduction de la croissance du phytoplancton et donc de l'exportation biologique de carbone de la surface vers les eaux plus profondes.

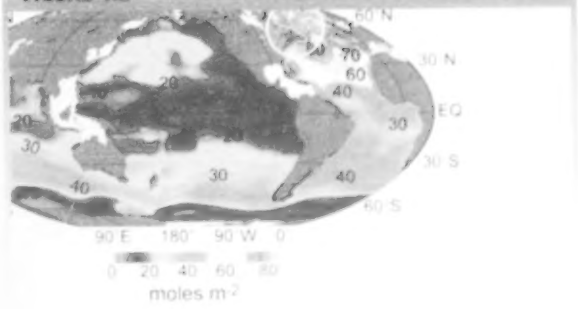
Les recherches sur les puits océaniques menées par le Canada ont été ciblées sur les trois océans nordiques qui le bordent. Leurs activités et résultats sont discutés ci-après.

4.2.1 Flux de carbone dans les régions de l'Atlantique Nord et de l'Arctique

4.2.1.1 Flux de CID dans la mer du Labrador.

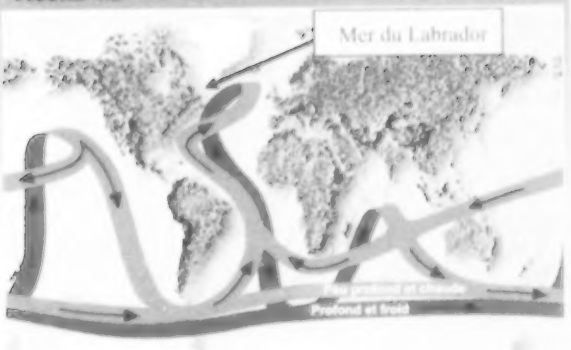
L'eau profonde nord-est-atlantique (EPNEA) et l'eau de déversement du détroit du Danemark (EDDD), avec l'eau de la mer du Labrador (EML), composent la branche inférieure du « tapis roulant » de l'océan mondial (*figure 4.3*). Dans ces régions, la formation d'eaux denses (froides et salées) en hiver crée un mouvement de descente qui transporte de grands volumes d'eau de la surface de l'océan vers ses régions profondes. Comme les gaz atmosphériques sont adsorbés dans les eaux de surface froides de l'Atlantique Nord, ce processus de formation d'eau profonde devient une voie majeure de transport des gaz de l'atmosphère dans les eaux de l'océan profond, où ils restent jusqu'à ce que le lent déplacement de la circulation thermohaline les ramène à la surface quelque 1000 ans plus tard, dans d'autres régions de l'océan qui connaissent des remontées.

FIGURE 4.2



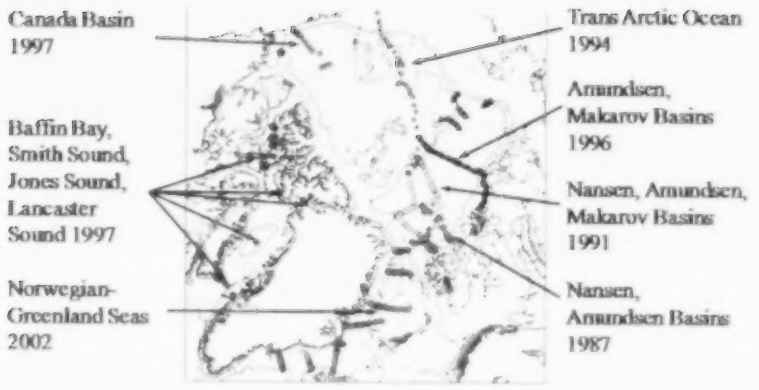
Stockage du carbone anthropique dans nos océans, d'après Sabine *et al.*, (2004). Environ 48 % de toutes les émissions dues aux combustibles fossiles se sont retrouvées dans l'océan, ce qui représente un tiers de son potentiel de stockage du CO_2. Les cercles définissent les zones activement étudiées par le MPO.

FIGURE 4.3



La grande circulation thermohaline de l'océan mondial, régie par la formation d'eaux froides et salées dans l'Atlantique Nord.

FIGURE 4.4



Expéditions dans l'océan Arctique, 1987-2002.

Le rôle joué par la mer du Labrador dans ce processus est une cible majeure des recherches du MPO sur les puits de carbone. Une partie des efforts vise à mieux comprendre le transport de carbone inorganique dissous (CID), ce qui inclut le CO_2 sous toutes ses formes chimiques présent dans l'eau de mer, ainsi que l'alcalinité. Comme la contribution anthropique aux très vastes réservoirs naturels de CID est relativement faible et donc difficile à déceler, les chercheurs s'intéressent également aux distributions océaniques des chlorofluorocarbures (CFC) pour retracer l'absorption et le transport de CO_2 anthropique. La fabrication des CFC remonte au milieu du siècle dernier, et leurs concentrations atmosphériques ont augmenté jusqu'à ce que le Protocole de Montréal en freine l'utilisation et le rejet. Comme la concentration des diverses formes de CFC a proportionnellement changé avec leurs temps de séjour dans l'atmosphère, ces rapports sont utiles pour déterminer à quand remonte le dernier contact des eaux océaniques avec l'atmosphère.

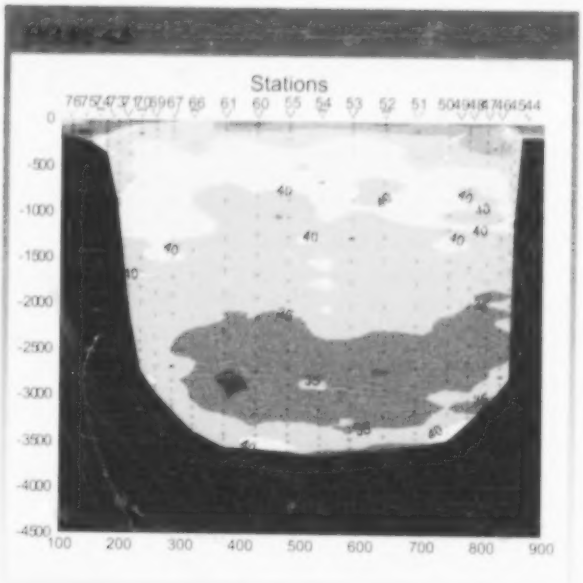
Ces études sur les traceurs menées dans la mer du Labrador ont donné aux chercheurs une idée des processus qui régissent la variabilité du stockage principal à long terme dans l'océan. Elles sont en outre complétées par celles effectuées dans le Pacifique Nord, où une remontée à long terme ramène l'eau de l'océan profond, avec le CO_2 qu'elle contient, en contact avec l'atmosphère. Dans les vingt dernières années, ces études ont aidé à quantifier les stocks naturels et anthropiques de CO_2 et leurs flux entre l'atmosphère et l'océan, et permis de mieux comprendre les mécanismes qui déterminent la variabilité des flux de CO_2 en réponse à des changements du climat.

Les relevés effectués par le MPO dans la mer du Labrador depuis une quinzaine d'années fournissent la plus longue série chronologique de mesures du CID et de traceurs transitoires dans l'Atlantique Nord (*figure 4.3*), et certaines des meilleures indications des changements subis par l'océan en réponse au climat (on discutera à la section 4.5 des changements des écosystèmes). Les mesures chimiques connexes permettent en outre de faire la distinction entre les processus physiques et les processus biologiques de séquestration du carbone. Les résultats montrent que 1,9 +/- 0,4 Gt de C anthropique sont présentement stockées dans la mer du Labrador. Ce stock représente 6,4 % du total pour l'Atlantique, même si la mer du Labrador ne constitue que 3,6 % du volume de cet océan. Sur une base annuelle, la mer du Labrador absorbe jusqu'à 0,06 Gt de C du CO_2 anthropique, mais ce taux, qui dépend de la profondeur de la ventilation en hiver, est très variable.

La *figure 4.5* présente un exemple d'un tel relevé effectué en 1997. On voit que les niveaux de carbone anthropique dans les eaux profondes de la mer du Labrador se situaient entre 30 et 50 µmol kg^{-1}. On trouvait des concentrations de C anthropique plus faibles entre environ 2000 et 3000 m, des eaux dont la dernière ventilation à la surface remontait à environ 12 ans. Toutefois, des concentrations plus élevées étaient observées près du fond, là où les eaux semblent avoir été ventilées plus récemment (5-7 ans).

Ces mesures des flux de CID et de CFC sont utilisées pour améliorer les modèles de la circulation dans l'Atlantique Nord et à l'échelle planétaire, qui aident à prédire l'importance relative de la pompe de solubilité et de la pompe biologique dans la séquestration du CO_2 à mesure que les eaux de surface continuent d'être touchées par le réchauffement planétaire. Il faudra donc disposer de modèles et poursuivre les observations pour répondre aux questions concernant la variabilité du puits de la mer du Labrador et l'impact du réchauffement climatique sur la capacité de l'océan à séquestrer le CO_2. Les modèles sont les outils qui nous permettent de projeter nos observations dans le futur. Cependant, nombre d'entre eux évoluent rapidement à mesure que progresse notre compréhension des processus océaniques. Comme l'a justement dit Quay (2000), « *les modèles vont et viennent, mais un bon ensemble de données n'est jamais périmé.* »

Les ensembles de données recueillis grâce à des programmes de recherche coopératifs internationaux ont aussi permis aux scientifiques concernés d'estimer le stock de C anthropique dans l'océan Arctique (1,3 Gt C, soit 1 % du contenu de l'océan mondial), et son taux de séquestration (0,026 Gt C an^{-1}, ~1 % du taux de l'océan mondial; Anderson *et al.*,



Niveaux de carbone anthropique dans la mer du Labrador entre Labrador (gauche) and Groenland (droit), observés pendent un relevé effectué en 1997.

1998). Il demeure cependant des questions quant à l'incidence qu'aura le changement des conditions glacielles sur le taux d'absorption de CO_2 par l'océan.

4.2.1.2 Carbone biogénique dans les bas niveaux trophiques de la mer du Labrador.

Du fait de leur complexité, les écosystèmes océaniques ne sont pas très bien compris, surtout au niveau du plancton. De nombreux modèles des écosystèmes réduisent cette complexité en ne définissant que deux groupes de phytoplancton basés sur la taille, ainsi que leurs brouteurs respectifs, avec les bactéries et quelques moteurs environnementaux agissant sur la croissance et la perte. Ce schéma biologique est ensuite intégré dans un océan à mélange actif. Toutefois, lorsque les écosystèmes sont soumis à des stress, certains groupes fonctionnels peuvent être altérés de manières qui ne sont pas facilement prévues dans ces modèles.

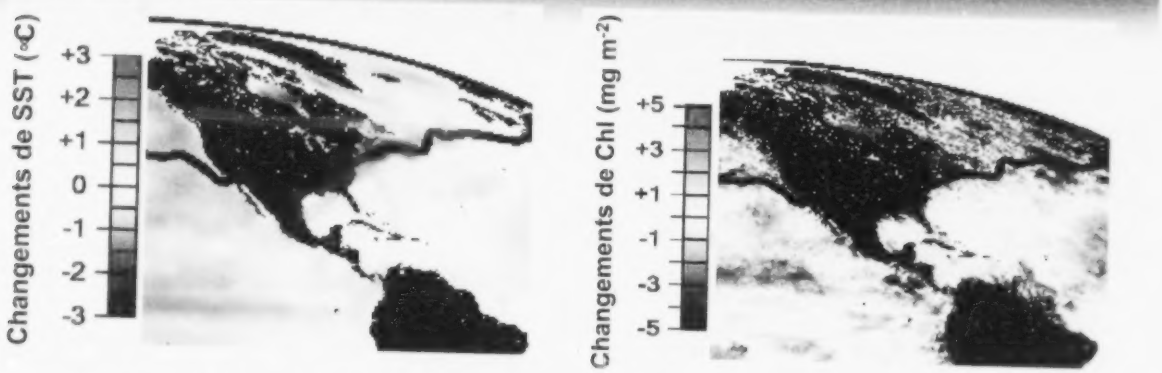
Récemment, Barber (2007) a présenté un modèle complexe qui montrait l'importance de la contribution du picoplancton (taille de 0,2 à 5 µm) à l'exportation du carbone, en ajoutant que de nouvelles informations donnent à penser que le rôle du picoplancton dans l'exportation du carbone et la production des poissons exigent d'être examiné plus avant tant dans les observations que dans les modèles.

D'autres recherches montrent la réponse de l'océan aux changements du climat. Dans les régions océaniques chaudes, la tendance de la dernière décennie a été une baisse de la production primaire nette (mesurée à partir de satellites) à mesure que les températures s'élevaient (Behrenfeld *et al.*, 2006). Dans des eaux plus fraîches, comme celles du nord de l'Atlantique (et du Pacifique), l'inverse pourrait se produire, puisqu'une augmentation de la stratification des couches supérieures de l'océan permet au phytoplancton de recevoir de plus grandes quantités de lumière.

Les données satellitaires suggèrent que ce pourrait être le cas dans la mer du Labrador (*figure 4.6*). Elles portent à penser que :

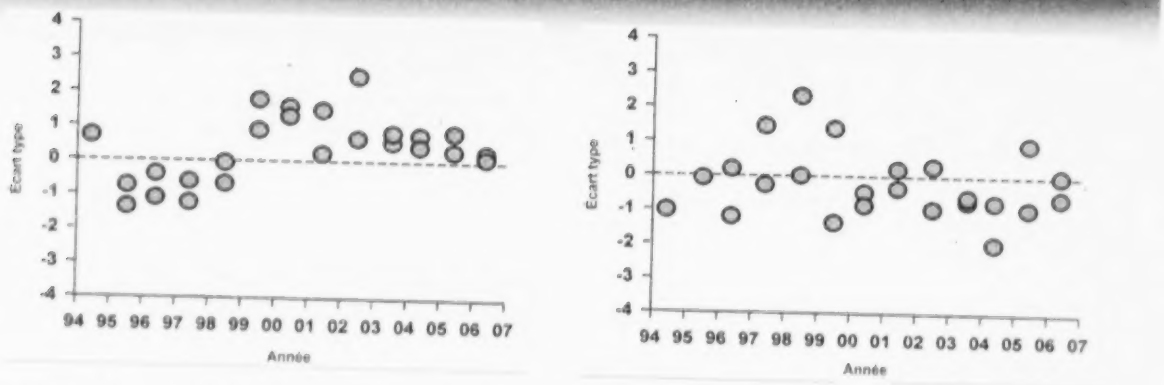
- Augmentation de la stratification de l'océan → augmentation de la biomasse de phytoplancton → augmentation de la matière organique dissoute → augmentation de la biomasse bactérienne → peut-être augmentation de l'exportation de C vers l'océan profond.

FIGURE 4.6



Changements de la température de surface de la mer (gauche) et de la chlorophylle (droite) issus d'observations satellitaires recueillies dans la dernière décennie (d'après Behrenfeld *et al.*, 2006).

FIGURE 4.7



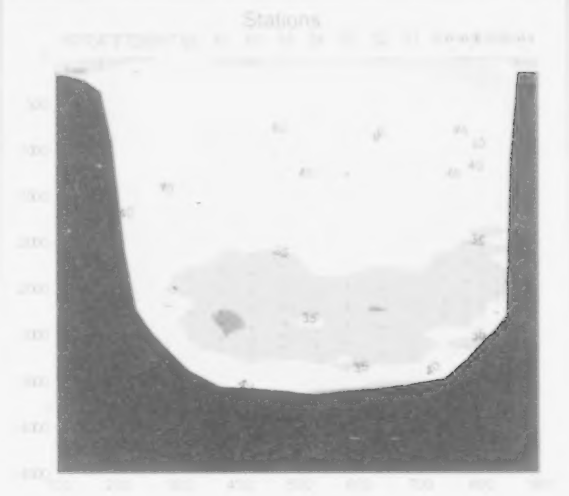
Tendances de l'anomalie dans (a) le dans (b) les bactéries (rouge) par rapport au COD (vert) sur la plate-forme du Labrador.picophytoplancton (vert) par rapport au rapport NO_3:Si (rouge), et dans (b) les bactéries (rouge) par rapport au COD (vert) sur la plate-forme du Labrador.

Cependant, les observations effectuées lors de transects répétés dans la mer du Labrador depuis 1994 montrent quelque chose de bien différent :

- Les eaux se réchauffent → la couche mélangée devient moins profonde → l'équilibre des nutriments se modifie (plus de nitrates par rapport aux silicates) → il y a augmentation du petit phytoplancton → la biomasse totale du phytoplancton **diminue** → la MOD **diminue** → la biomasse bactérienne **diminue** → peut-être l'exportation de C via la pompe biologique est-elle en train de diminuer.

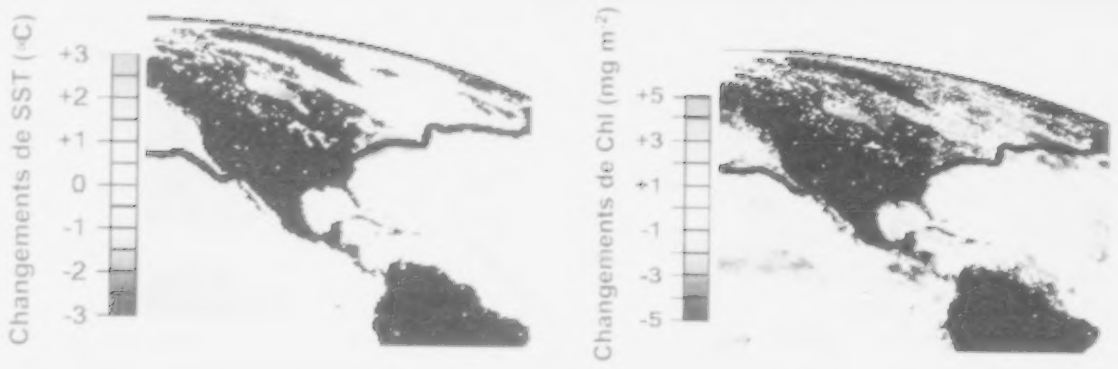
Pour recueillir les indications de ces changements, il a fallu procéder sur plus d'une décennie à un échantillonnage massif de la biomasse du plancton, et des processus, nutriments et propriétés physiques qui lui sont associés. En outre, les données satellitaires (surtout SeaWIFS pour la chlorophylle *a*) ont fourni des détails sur les cycles annuels et les changements interannuels. En normalisant les ensembles de données par rapport à la moyenne de leur série chronologiques, on peut évaluer les tendances. Par exemple, les petits phytoplanctontes de la plate-forme du Labrador (dont la plupart n'ont pas de besoin impératif en silicates) sont plus abondants lorsque le rapport

FIGURE 4.5



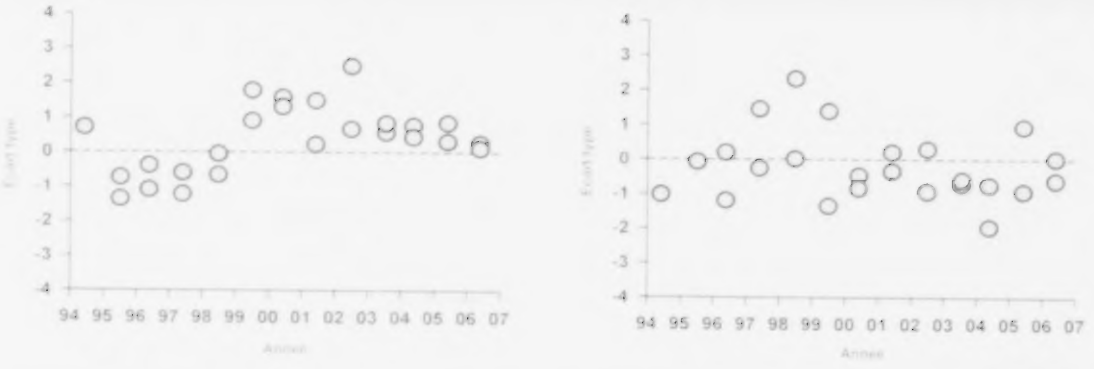
Niveaux de carbone anthropique dans la mer du Labrador entre Labrador (gauche) and Groenland (droit), observés pendent un relevé effectué en 1997.

FIGURE 4.6



Changements de la température de surface de la mer (gauche) et de la chlorophylle (droite) issus d'observations satellitaires recueillies dans la dernière décennie (d'après Behrenfeld *et al.*, 2006).

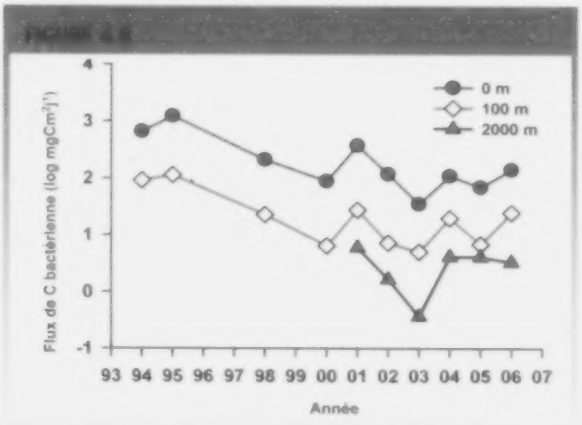
FIGURE 4.7



Tendances de l'anomalie dans (a) le dans (b) les bactéries (rouge) par rapport au COD (vert) sur la plate-forme du Labrador picophytoplancton (vert) par rapport au rapport NO_3:Si (rouge), et dans (b) les bactéries (rouge) par rapport au COD (vert) sur la plate-forme du Labrador.

nitrates:silicates est élevé (*figure 4.7*). Dans un tel régime relativement maigre en silicates, les gros phytoplanctontes (surtout les diatomées qui ont besoin de silicates) connaîtraient un désavantage concurrentiel. Dans la même région, la biomasse bactérienne tend à covarier avec le carbone organique dissous et la biomasse du mésozooplancton a été inversement proportionnelle à celle du phytoplancton (plus de zooplancton = moins de chlorophylle). Les tendances faibles de ces corrélations sont renforcées quand on les voit persister sur de nombreuses années.

Pour évaluer l'exportation de carbone à partir de la surface de l'océan via la pompe biologique, on procède généralement par piégeage des particules détritiques qui s'enfoncent. Dans la mer du Labrador, ce flux de particules exporte vers les profondeurs ~1,3 % de la production primaire annuelle (*figure 4.8*). Le transport vertical de carbone est surtout organique au printemps et en été, mais présente une forte composante inorganique (carbonate de calcium) à l'automne. La croissance et la respiration des bactéries dans la colonne d'eau consomme la plus grande partie du carbone organique présent dans les particules qui s'enfoncent, le convertissant en biomasse qui sera transférée vers les niveaux trophiques plus élevés et en CO_2 qui sera rejeté dans le réservoir de carbonates dissous. Les flux de COD sont assez mal évalués, mais pourraient assurer une fraction substantielle de l'exportation de carbone (voir les résultats de modélisation à la section 4.6). Depuis 1993, on observe une baisse de la quantité apparente de carbone organique consommée par les bactéries.

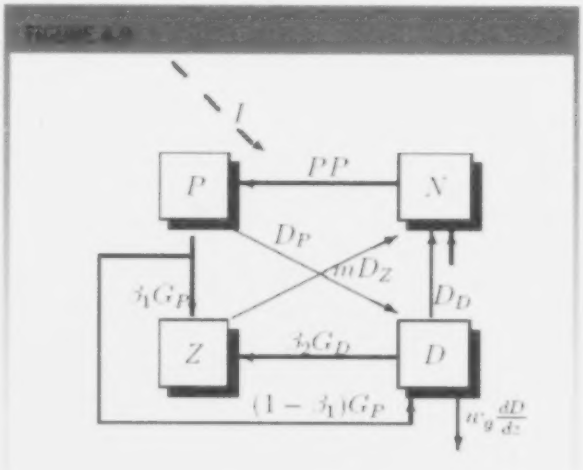


Flux descendant de carbone susceptible de dégradation bactérienne.

Si on se base sur les études effectuées aux sections 4.4 et 4.5, la tendance actuelle serait que la mer du Labrador devient un puits plus faible du carbone anthropique, en raison à la fois d'une réduction de la ventilation de l'océan (pompe de solubilité) et des changements de la structure des écosystèmes (pompe biologique). Cette tendance concorde avec les conclusions de récents rapports du GIEC (IPCC, 2007a).

4.2.1.3 Modélisation des puits de carbone naturel dans la mer du Labrador.

Les modèles aident à résoudre d'importants processus de transport à la fois lorsque de riches ensembles de données sont trop complexes pour être interprétés par de simples corrélations, et lorsqu'il n'y a pas suffisamment de données pour décrire les processus annuels et les changements s'étalant sur des décennies. Pour le Pacifique comme pour l'Atlantique, les modèles reposent sur un écosystème simple (*voir la figure 4.9*) intégré dans une couche océanique supérieure active, qui est largement régie par le mélange éolien et le réchauffement solaire. À mesure que des programmes tels que JGOFS et SOLAS permettent d'en savoir plus sur la circulation des couches supérieures de l'océan et sur les paramètres régissant les communautés biologiques, les modèles évoluent pour mieux rendre les processus dominants responsables, par exemple, du transport de carbone dans les eaux subarctiques.



Une modèle simple d'une écosystème pour représenter les flux de carbone entre les réservoirs de phytoplancton (P), zooplancton (Z) et détritus.

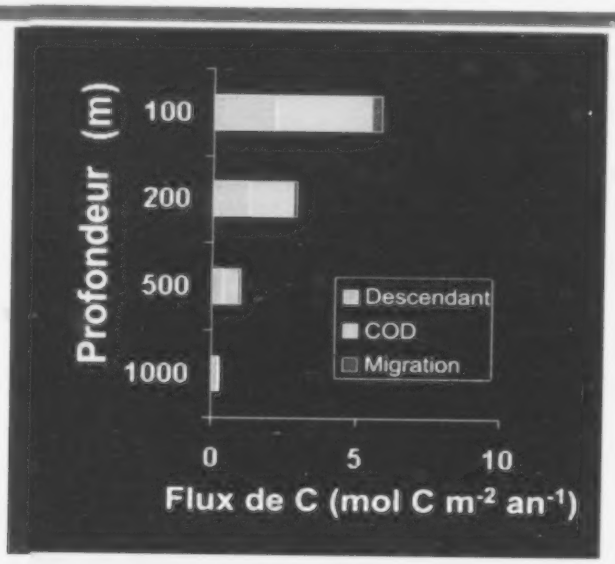
Tian *et al.*, (2004) ont construit un modèle physique de la circulation dans la mer du Labrador à partir d'observations effectuées dans les années 1990 pour mieux comprendre le rôle du cycle saisonnier de la production dans l'exportation de carbone vers l'océan profond. Comme ce modèle a été monté avec des données correspondant à un épisode de ventilation profonde, il postulait que le mélange annuel en hiver descendait à une profondeur de 2400 m. Des profils verticaux de la concentration de chlorophylle, du mésozooplancton, des nitrates, de l'ammonium, des bactéries et du COD, et les données de l'enregistreur en continu du plancton pour le phytoplancton et le mésozooplancton ont été utilisés pour contraindre le modèle biologique. Dans ce modèle, les compartiments sont homogènes en ce qui concerne leur fonction dans l'écosystème, et les paramètres décrivant le flux entre les compartiments sont fixés sur le domaine de la simulation. Une des résultats surprenants de la simulation basée sur ce modèle a été que le COD composait 56 % du carbone biogénique exporté dans les 500 premiers mètres (*figure 4.10*). La plus grande partie de cette exportation survenait au début de la convection profonde hivernale. Cependant, à 1000 m, les particules qui s'enfonçaient représentaient 96 % du flux vers le bas et le COD 4 %.

Avec le temps, les modèles des écosystèmes de la mer du Labrador ont évolué pour permettre une adaptation aux facteurs environnementaux au sein des compartiments et des interactions entre compartiments. Les paramètres du modèle peuvent changer avec des conditions comme la température ambiante, les préférences alimentaires, la structure par tailles des communautés ou, dans le cas des bactéries, la facilité avec laquelle le réservoir de COD peut être utilisé. Cette approche s'est révélée fructueuse pour reproduire les grandes caractéristiques des écosystèmes pour plusieurs types d'eaux dans l'Atlantique Nord à l'aide d'un seul modèle. Si on n'inclut pas d'adaptation à la température pour des processus tels que la mortalité du phytoplancton et le broutage de zooplancton, les abondances du phytoplancton sont mal représentées dans les régions subtropicales et subarctiques.

Le modèle de la mer du Labrador a été utilisé pour tester les changements survenus dans la pompe biologique sur une période de 50 ans. Sa composante physique reproduit la tendance observée à un accroissement de la stratification de l'océan, qui résulte peut-être plus d'une augmentation des flux d'eau douce que du réchauffement de l'océan (ce qui concorde avec les tendances dans le Pacifique subarctique, probablement dues à un accroissement de l'évaporation dans les régions subtropicales). L'accroissement de la stratification cause des tendances variables dans la biomasse du phytoplancton et des bactéries, mais montre que ces populations se suivent. Ce qui est plus frappant, cependant,

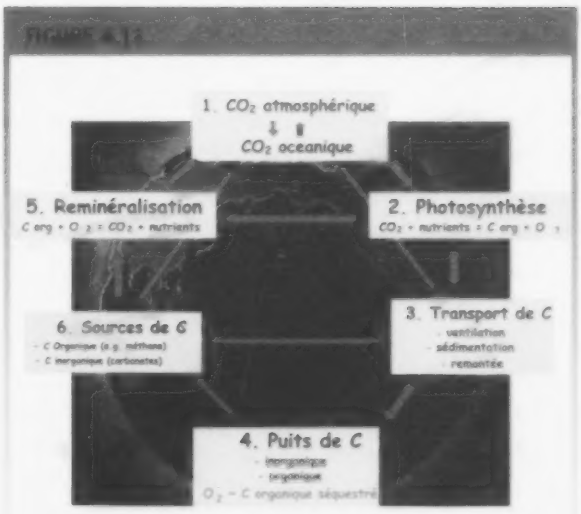
FIGURE 4.10

Exportation de carbone biogénique vers la zone mésopélagique (100 à 1000 m).



est le lent déclin de l'exportation de COP sur 50 ans et le déclin brutal de l'exportation du COD dans la dernière décennie, ces exportations ayant baissé de 0,7 GC m^{-2} an^{-1} entre 1990 et 2005, selon les résultats du modèle.

En résumé, la simulation sur 50 ans de la mer du Labrador montre que l'accroissement de la stratification en surface entraîne une légère baisse de la production primaire (la population se composant de cellules plus petites; voir la section 4.5), mais une réduction de l'exportation de C biogénique sur les 15 dernières années. La modélisation saisit certains des changements constatés par les satellites et les programmes d'observation. Des changements soutenus du forçage entraînent des changements de régime modélisés dus à des améliorations de la représentation des boucles de rétroaction. Ces améliorations sont nécessaires pour mieux représenter les flux d'eau douce et les contrôles trophiques des bactéries. Cependant, les changements survenant dans l'océan commencent à perdurer sous l'effet du réchauffement planétaire, et les modèles montrent un certain succès dans la description de ces conséquences. La poursuite des efforts d'observation et de modélisation dans les régimes clés des latitudes supérieures est plus nécessaire que jamais.



Les grands flux de carbone entre l'atmosphère et l'océan, et au sein de l'océan.

4.2.2 Le carbone dans le Pacifique Nord

Le groupe de l'ISM chargé de la chimie du climat, sous la direction de C.S. Wong, effectue des mesures des flux de carbone dans le Pacifique Nord depuis le milieu des années 1970. En 1982, ils ont commencé à déployer des pièges à sédiments à la Station océanique Papa (SOP) en vue de mesurer les flux de carbone et d'autres matières particulaires biogéniques vers l'océan profond. Au cours de ces 3 décennies, des mesures compagnes ont été prises sur la productivité primaire, les nutriments, les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère et l'océan, le carbone organique particulaire (COP), le carbone inorganique dissous (CID), l'alcalinité et, dans les dernières années, le fer. Des études antérieures avaient fourni la base de recherches élargies dans le cadre du PRDE, qui comportaient une augmentation du déploiement de pièges à sédiments dans tout le Pacifique, des mesures régulières du CID et de l'alcalinité sur les transects de relevé, l'utilisation de navires occasionnels pour connaître les changements saisonniers dans les eaux de surface du Pacifique subarctique, des mesures de traceurs océaniques (p. ex. des CFC) pour aider à comprendre l'absorption des gaz par les océans, et la fertilisation par le fer des couches supérieures de l'océan afin de déterminer si cet enrichissement pouvait faire croître l'absorption de dioxyde de carbone par l'océan. Les conclusions de ces programmes seront examinées dans le contexte du processus de transport décrit à la *figure 4.11*. L'expérience d'enrichissement en fer est discutée à la section 4.2.3 ci-dessous.

4.2.2.1 Flux atmosphère – océan.

Wong et Chan (1991) ont constaté que les eaux du nord-est du Pacifique étaient un faible puits de CO_2, avec des taux d'absorption estimés à 8 g C m^{-2} an^{-1} dans les années 1970. Avec l'aide de navires occasionnels (SOO, ligne bleue de la *figure 4.12*) jusqu'à la fin des années 1990, et en collaboration avec des chercheurs japonais, Zeng *et al.*, (2002) ont estimé l'absorption de CO_2 dans le Pacifique subarctique (34N à 53N) à 0,26 Gt C an^{-1}, soit plus de 10 % de la séquestration océanique annuelle de carbone anthropique. En fait, la plus grande partie du stockage océanique de carbone de combustible fossile prend place dans la région thermocline des couches supérieures de l'océan. C'est seulement dans l'Atlantique Nord qu'on trouve du C anthropique à des profondeurs supérieures à 1500 m (voir la section 4.4), ce stockage en profondeur constituant ~7 % du stock dans l'océan (Sabine *et al.*, 2004).

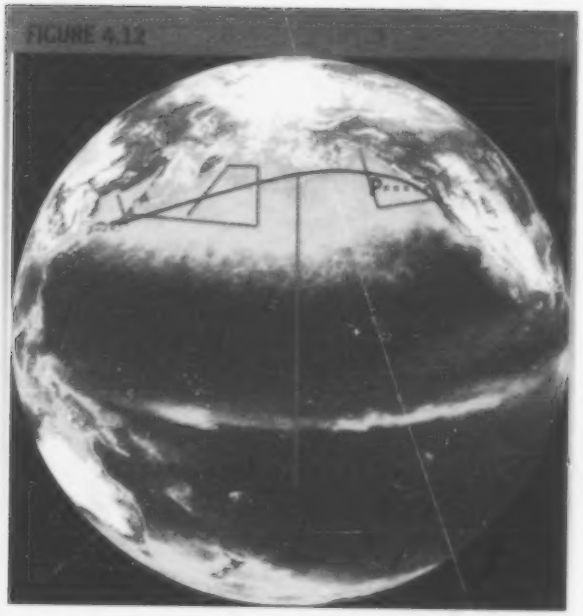


FIGURE 4.12

Emplacement des études des flux de carbone dans le Pacifique Nord. P indique la *Station océanique P* (SOP). Les lignes de relevé sont présentées sur une image de la chlorophylle de l'océan.

4.2.2.2 Productivité primaire.

Sauf sur ses marges continentales, le Pacifique subarctique regorge de nitrates, d'acide silicique et de phosphates pendant toute l'année parce que la croissance du phytoplancton est limitée par l'apport en fer et la lumière en hiver. Wong *et al.*, (1995, Can. J. Fish. Aquat. Sci.) ont donné une bonne estimation de la productivité primaire à la SOP, soit 140 g C m^{-2} an^{-1} sur la base de mesures *in situ* effectuées sur plus d'une décennie. Des relevés à la surface de l'océan effectués le long de la ligne P allant de la côte du Canada à la SOP, et dans le Pacifiques par des navires occasionnels (SOO), ont fourni des estimations saisonnières de la nouvelle production basées sur la consommation de nutriments (ligne P – 16 à 20 g C m^{-2} an^{-1}; SOO – 32 à 56 g C m^{-2} an^{-1}). Pendant le programme JGOFS, au milieu des années 1990, il est devenu apparent que le fer était le nutriment limitant dans la Pacifique subarctique. C'est ce qui a poussé le groupe de la chimie du climat à élaborer des mesures sensibles et non contaminées du fer dans l'eau de mer. Cette capacité a ensuite permis de procéder à l'expérience d'enrichissement en fer SOLAS en 2002, et le groupe a pu estimer le transport de fer à partir des côtes de la Colombie-Britannique et de l'Alaska par les tourbillons de méso-échelle (Johnson *et al.*, 2005). Plus tôt, Wong et Matear (1991) avaient remarqué que l'acide silicique peut à l'occasion devenir un nutriment limitant à la SOP. Ils avaient avancé que l'augmentation du transport de fer pourrait être responsable de ces occurrences épisodiques. Pendant l'expérience d'enrichissement en fer, on a de nouveau constaté un appauvrissement de l'acide silicique, ce qui a conduit les modélisateurs à considérer tant le fer que l'acide silicique comme des facteurs potentiellement limitants de la croissance du phytoplancton.

4.2.2.3 Flux de particules sur l'horizontale.

En utilisant des pièges à sédiments pour recueillir les particules qui s'enfoncent, on peut estimer les flux de C et d'autres éléments biogéniques (N, Si, fer, etc.) jusqu'à de grandes profondeurs. À partir de 1982, et en collaboration avec la Woods Hole Oceanographic Institution, le groupe de la chimie du climat a commencé à déployer des pièges à la SOP. Pendant les années 1990, le programme s'est élargi avec des déploiements dans tout le Pacifique subarctique (*figure 4.13*).

FIGURE 4.13

Déploiements de pièges à sédiments dans l'océan Pacifique subarctique entre 1982 et 2006.

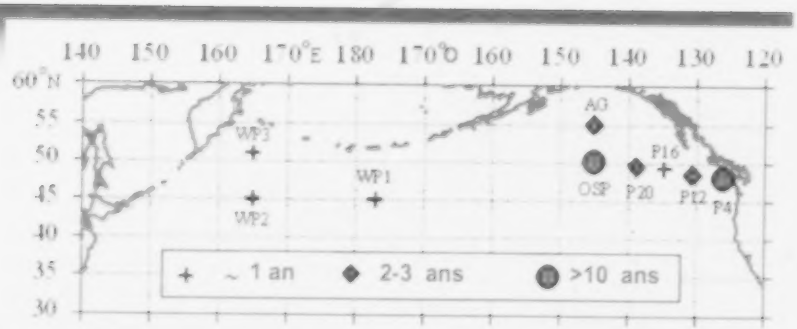
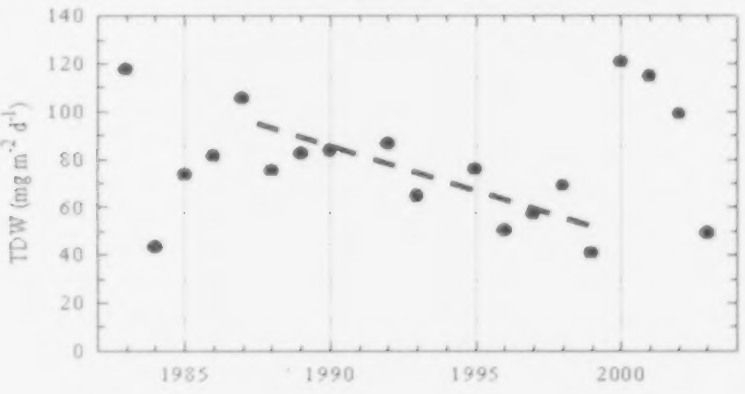


FIGURE 4.14

Poids sec total (PST) annuel du flux de particules jusqu'à 3800 m enregistré à la SOP. On remarquera la période de décroissance du flux vertical pendant les années 1990, chaudes. Les flux ont augmenté après l'épisode La Niña de 1999, à mesure que les niveaux de nutriments en surface remontaient après les minimums du milieu à la fin des années 1990.



La tendance générale observée à ces sites était que les flux de carbone sont plus importants près des marges continentales parce que l'apport en fer et le transport/mélange y sont plus importants, ce qui augmente la productivité primaire. À la SOP, les flux mesurés étaient de 6,6 g C m^{-2} an^{-1} jusqu'à 200 m et de 1,1 g C m^{-2} an^{-1} jusqu'à 3800 m (Wong *et al.*, 1999). À l'occasion, les flux étaient plus élevés, ce qui suggère que des processus tels que des tourbillons de méso-échelle, des épisodes de dépôt de poussière éolienne (fer) ou des proliférations de plancton peuvent faire croître considérablement le transport du carbone. On a trouvé, dans les 50 ans d'enregistrement de la SOP, des indications du passage de tourbillons (Whitney *et al.*, 2007). Dans l'est du Pacifique subarctique, les hausses de niveau de chlorophylle au large n'ont été associés qu'à ces tourbillons (Crawford *et al.*, 2007)

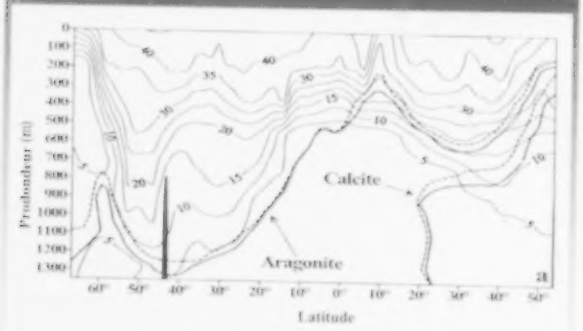
Les pièges à sédiments sont un excellent outil pour observer la variabilité interannuelle de la productivité primaire et du transport vertical de C qui peut être causée par des changements de la stratification de l'océan libre entraînés par exemple par un épisode El Niño. Le Pacifique Nord a souvent été le théâtre d'épisodes El Niño dans les années 1990, ce qui a fait croître la stratification des couches supérieures de l'océan, baisser l'apport hivernal de nutriments dans la couche de mélange (plus pour l'acide silicique que pour les nitrates, puisqu'il faut un mélange plus profond pour donner accès à la Si reminéralisée) et baisser la productivité primaire. Les études sur le phytoplancton ne font généralement pas partie du programme de surveillance de la SOP; cependant, on sait qu'une baisse de l'apport en acide silicique affecte la croissance des plus gros éléments du phytoplancton (diatomées), ce qui entraîne un décalage de la communauté vers les éléments plus petits (voir la section 4.5), lequel se traduit par une baisse de l'exportation de carbone par le biote (*figure 4.14*). Le programme des pièges à sédiments est maintenant terminé, puisque le financement du PRDE a pris fin en 2006.

4.2.2.4 Reminéralisation et puits du carbone.

Les études menées à l'aide des pièges montrent qu'environ 3 % du carbone fixé par la production primaire descend à plus de 200 m de profondeur, et 1 % atteint 3800 m à la SOP. Les sédiments du fond marin de cette région contiennent peu de C, et les taux de sédimentation sont très bas. Le stockage du C dépend donc de la capacité de l'eau de mer de piéger le CO_2 reminéralisé et de la fréquence des échanges de gaz entre l'océan profond et l'atmosphère. Dans les 50 dernières années, l'oxygène a diminué de 22 % à la SOP sur la plage de profondeurs de 100 à 500 m (Whitney *et al.*, 2007). De nombreuses autres observations confirment que cette tendance est courante dans tout le Pacifique subarctique, la cause en étant une réduction de la ventilation de l'océan intérieur le long des côtes du Japon et de la Russie. L'intensification de la stratification des couches supérieures de l'océan semble due à un adoucissement et à un réchauffement de la couche de surface. L'adoucissement de cette couche, observé dans le nord de l'Atlantique comme du Pacifique, est probablement attribuable à une augmentation de l'évaporation dans les eaux tropicales et subtropicales, mais la fonte des glaces peut aussi y contribuer.

Avec une réduction de la ventilation de l'océan dans le Pacifique subarctique, les processus biotiques prendront une relativement plus grande importance dans la séquestration du C. À partir des mesures des CFC et du CID faites pendant

FIGURE 4.15



La profondeur à laquelle la calcite et l'aragonite se dissolvent dans le Pacifique remonte avec le temps, en raison de l'acidification de l'océan causée par l'augmentation des niveaux de CO_2 (d'après Feeley *et al.*, 2002).

la campagne WOCE. Matear *et al.*, (2003) ont estimé que le Pacifique Nord (20N à 65N) avait stocké 1,1 Gt de C anthropique pendant les années 1980. Cependant, l'apport de nutriments dans la couche de surface diminue avec la stratification du Pacifique Nord (Whitney *et al.*, 1998). Les observations confortent donc les résultats modélisés (sections 4.6 et 4.8), à savoir que la pompe biologique est en train de s'affaiblir.

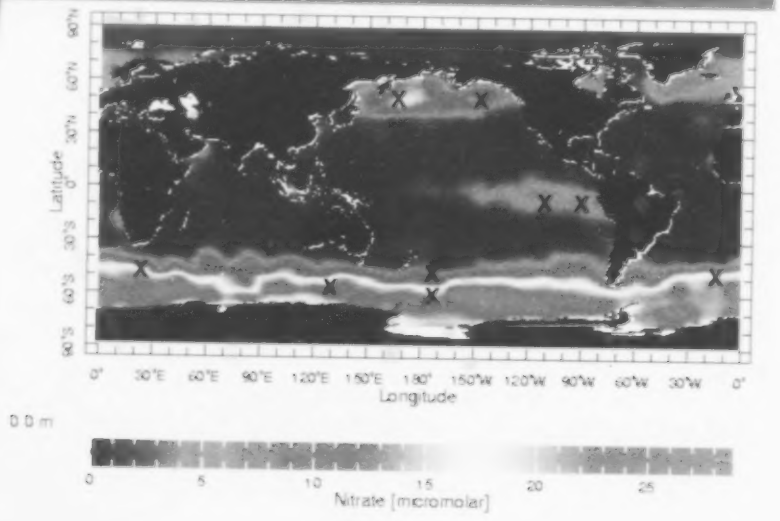
Ce qui est préoccupant pour l'augmentation du stockage de C dans l'océan est que la profondeur de dissolution des deux formes de carbonate de calcium diminue (*figure 4.15*). À l'heure actuelle, dans le Pacifique subarctique, c'est seulement dans les 200 premiers mètres de la surface que les carbonates peuvent être stockés dans les sédiments. À mesure que les océans s'acidifieront avec l'augmentation du stockage de CO_2, les carbonates sédimentaires vont se dissoudre et les organismes marins dont les exosquelettes utilisent des carbonates pourront avoir de la difficulté à survivre. Les changements survenus dans les eaux intermédiaires du Pacifique subarctique (baisse de l'oxygène, augmentation de l'acidité, réchauffement) influent déjà sur les écosystèmes côtiers. Dans la région de remontée le long des côtes du Washington et de l'Oregon, on observe chaque été des mortalités de poissons et de crabes depuis plusieurs années, alors qu'on n'en voyait pas auparavant. Les eaux de remontée présentent une faible teneur en oxygène (hypoxie) et une forte teneur en nutriments, qui se combinent pour faire suffoquer les animaux qui ne peuvent pas se déplacer pour trouver refuge ailleurs. Sur la côte de la Colombie-Britannique, les indications fournies par les prises de la pêche commerciale donnent à penser que plusieurs espèces de poissons de fond sont obligées de gagner des habitats moins profonds à mesure que baissent les teneurs en oxygène (Sinclair et Whitney, non publié).

4.2.3 Séquestration de CO_2 dans l'océan grâce à la fertilisation par le fer – qu'avons-nous appris?

Le carbone passe de l'atmosphère dans l'océan sous l'effet de la pompe de solubilité ou des pompes biologiques. La pompe de solubilité est le processus physique par lequel le CO_2 se

FIGURE 4.16

Carte des niveaux de nitrates en surface dans l'océan mondial. Les X indiquent les endroits où ont été menées des expériences d'enrichissement en fer.



dissout dans les eaux océaniques froides, puis est transporté vers l'océan profond où il est séquestré pendant des périodes se chiffrant en siècles ou en millénaires. La pompe de solubilité la plus efficace est celle de l'Atlantique Nord, où le mélange hivernal produit des eaux denses, qui coulent jusqu'au fond de l'océan.

La pompe biologique, de son côté, concerne les processus biotiques dans lesquels le CO_2 est absorbé par des végétaux et transformé en carbone organique. Une partie de ce carbone fixé tombe de la couche de surface vers le fond de l'océan sous la forme de détritus. Le Pacifique Nord est une région où le biote ne prélève pas la totalité des nutriments (nitrates et acide silicique); c'est pourquoi la pompe biologique ne semble pas y fonctionner avec une efficacité maximale. Des considérations de lumière et de fer freinent la productivité primaire dans la plus grande partie du Pacifique subarctique, conclusion bien étayée par l'intermédiaire du programme JGOFS canadien au milieu des années 1990. C'est à la lumière de ces résultats, et de ceux concernant deux autres régions océaniques présentant des excès de nutriments (l'océan Austral et le Pacifique équatorial, *figure 4.16*), qu'il a été envisagé de faire croître la séquestration océanique du carbone par l'ajout de fer dans ces régions de l'océan.

Sur les traces de grandes expériences menées dans le Pacifique équatorial et dans l'océan Austral, la communauté canadienne de SOLAS a organisé et réussi à financer une expérience de fertilisation par le fer à proximité de la Station océanique P (SOP), appelée SERIES (Subarctic Ecosystem Response to Iron Enrichment Study, ou Étude de la réponse de l'écosystème subarctique à un enrichissement en fer). Une zone de 10 km sur 10 km a été enrichie en fer par le groupe de la chimie du climat de l'ISM, après quoi des scientifiques installés à bord de 3 navires du Canada, du Mexique et du Japon ont suivi les changements chimiques et biologiques sur une période de 28 jours. Les mesures du fer, du CO_2, des traceurs, du sulfure de diméthyle et du carbone organiques effectuées grâce à l'appui du PRDE au groupe chimie du climat ont été la clé du succès de l'expérience. En outre, le MPO a fourni du temps de navire et assuré de nombreuses mesures physiques et chimiques régulières pour aider à expliquer la dérive, l'expansion et la déformation de la zone enrichie en fer.

Après 3 semaines et deux ajouts de fer, une importante prolifération du phytoplancton épuisa l'acide silicique et le fer présents dans l'eau de mer, ce qui la fit effondrer et causa un important flux de silice à partir de la couche de surface. Cependant, même si au cours de cette expérience on a constaté une exportation verticale à partir de la zone enrichie (que d'autres expériences n'ont pas observée), seulement une faible quantité de carbone a quitté les 100 premiers mètres de l'océan. De toute évidence, les écosystèmes de l'océan ouvert arrivent bien à conserver la plus grande partie du carbone et de l'azote fixés par la productivité primaire, même en cas de perturbation sérieuse. On a observé une forte exportation de silice, ce qui a porter à envisager que l'enrichissement en fer pourrait appauvrir l'acide silicique des eaux subarctiques, et donc entraîner d'énormes fluctuations écologiques qui pourraient réduire significativement le transfert d'énergie vers les niveaux trophiques supérieurs.

Un modèle biophysique a été élaboré pour décrire les cycles annuels de l'azote, du carbone, de l'acide silicique et du fer à la SOP. Ce modèle permettait d'identifier les processus régissant la production primaire et secondaire dans les conditions normales. Il a pu reproduire les observations effectuées pendant l'expérience de manipulation du fer. Quand on ajoutait du fer, à la fois le Fe et la Si devenaient des nutriments limitants critiques de la croissance du phytoplancton à la SOP (Denman *et al.*, 2006; Ianson *et al.*, en prép).

La modélisation et les observations de cette expérience d'enrichissement en fer ont permis d'arriver à quelques importants résultats, dont :

- SERIES a été unique en ce sens que la zone enrichie a été observée assez longtemps pour qu'on puisse déterminer l'exportation de carbone;
- l'exportation de carbone n'a pas été améliorée;
- il a fallu un second ajout de fer pour créer une prolifération de diatomées;
- l'exportation totale de carbone baisse à mesure qu'augmente la taille de la zone enrichie;
- l'acide silicique (Si) deviendra probablement limitant dans le nord-est du Pacifique dans des conditions d'abondance de fer;
- la limitation de la Si par l'enrichissement en fer peut entraîner une augmentation à long terme du pCO_2;

- la limitation de la Si sera accrue si la taille de la zone enrichie augmente;
- la fertilisation par le fer fait descendre les nutriments plus bas dans l'océan et, avec le temps, réduit la capacité de la pompe biologique à séquestrer le carbone;
- les résultats de la modélisation montrent que des régimes de fertilisation par le fer à grande échelle n'aideraient pas à la séquestration océanique du carbone anthropique.

4.2.4 Impact du PRDE sur le développement de modèles au CCmaC (Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat)

À titre d'effort conjoint, EC et le MPO ont créé un groupe de modélisation, basé à l'université de Victoria, pour faire progresser la compréhension du Canada quant au réchauffement planétaire et à ses impacts sur notre territoire de compétence. Sous le leadership de Ken Denman, un compartiment d'océan actif a été élaboré afin d'améliorer les prévisions des changements atmosphérique projetés pour les prochaines décennies. Un océan actif doit présenter des variations saisonnières, un mélange actif et une biologie réaliste. Le financement du PRDE a particulièrement aidé cet important effort en appuyant les progrès de la modélisation des écosystèmes.

4.3 Dans quelle mesure avons-nous atteint les objectifs du PON 6.2.1?

Sans le financement du PRDE et d'autres sources à orientation nationale comme le programme du climat de l'océan et le Fonds scientifique stratégique du MPO, les océanographes canadiens n'auraient guère pu contribuer au plus grand débat environnemental de la présente décennie et des suivantes – le réchauffement planétaire. Des programmes de recherche solides, certains avec des éléments observationnels bien conçus, fournissent depuis quelques dizaines d'années des données provenant de régions océaniques rarement visitées par d'autres nations, et révèlent certains changements frappants de leur nature physique, chimique et biologique. Nos études du Pacifique subarctique, de l'Atlantique Nord et de l'océan Arctique permettent aux scientifiques canadiens d'aborder avec conviction la question du changement climatique. C'est ainsi que les chercheurs du MPO ont pu apporter des contributions substantielles aux rapports 2007 du GIEC sur l'évolution du climat.

Les recherches liées au PRDE ont eu les résultats suivants :

- meilleure compréhension du cycle océan-atmosphère du carbone (la hausse des niveaux de CO_2 entraîne une acidification de l'océan, qui fait augmenter la solubilité des carbonates; l'augmentation de la stratification de l'océan conduit à une baisse des apports de nutriments dans ses couches superficielles et à des changements des écosystèmes dus à une baisse de l'apport en acide silicique; une meilleure évaluation de la productivité primaire et du transport de particules sur la verticale fournit des estimations du transport de C vers l'océan profond à ~1 % de la productivité primaire; l'importance de la ventilation dans le transport océanique de CO_2 et d'oxygène dans l'océan est mieux comprise, les implications de la diminution de la ventilation ont été réalisées, y compris la perte d'habitat et d'espèces visées par la pêche commerciale et autres éléments de l'écosystème);
- amélioration des mesures du recyclage du carbone qui ont été utilisées pour initialiser les modèles développés afin de prédire les impacts du réchauffement planétaire sur l'océan et les masses terrestres. Ces modèles donnent à penser que les océans deviennent un moins bon puits de CO_2 qu'ils ne l'étaient dans les dernières décennies. On prévoit qu'il s'ensuivra une accélération du taux d'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère;
- solide indication que l'océan ne peut pas facilement être fertilisé pour séquestrer le carbone (les expériences d'enrichissement en fer n'ont pas réussi à séquestrer le C et montrent que des manipulations de ce genre entraîneraient des changements radicaux dans les écosystèmes qui font vivre les pêches et les autres organismes marins);
- amélioration des modèles biophysiques tant pour l'Atlantique que pour le Pacifique, grâce à la participation à des programmes tels que SOLAS et JGOFS. L'augmentation de la complexité et de l'adaptabilité des écosystèmes permet de les simuler de manière plus réaliste sur des étendues géographiques plus vastes.

Ken Denman, du MPO, était un des auteurs principaux du rapport du GIEC sur les éléments scientifiques du changement climatique; parmi les réviseurs de ce chapitre figurait R.A. Clarke, du MPO. Leur expertise a découlé d'observations et de modélisations de l'océan appuyées par le PRDE.

RÉFÉRENCES GIEC

Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. Cox, R.E. Dickinson, D. Haugustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S. C. Wofsy et X. Zhang, 2007. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry, p. 499-587, In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (dir.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York, NY, USA.

GIEC, 2007b. « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité*, Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation, Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson, Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge University Press.

IPCC, 2007b. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge(Royaume-Uni), 7-22.

GIEC, 2007c. « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Bilan 2007 des changements climatiques : L'atténuation des changements climatiques*, Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation, Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer, Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge University Press.

RÉFÉRENCES ISSUES DE RECHERCHES FINANCÉES PAR LE PRDE (LISTE NON EXHAUSTIVE)

Anderson, L.G., Jones, E.P. et Swift, J.H. 2002. Export production in the central Arctic Ocean evaluated from phosphate deficits. *Journal of Geophysical Research* 108. DOI 10.1029/2001JC001141.

Anderson, L.G., Olsson,K., Jones, E.P. , Chierici,M. et Fransson,A. 1998. Anthropogenic carbon dioxide in the Arctic Ocean: Inventory and sinks. *Journal of Geophysical Research*, 103, 27707-27716.

Azetsu-Scott, K., Gershey, R.M. et Jones, E.P. 2005. Distribution and Ventilation of Water Masses in the Labrador Sea inferred from CFCs and Carbon Tetrachloride. *Marine Chemistry*, 94, 55-66.

Azetsu-Scott, K., Gershey, R.M. Jones, E. P. et Yashayaev, I. 2003. Time Series Study of CFC Concentrations in the Labrador Sea during Deep and Shallow Convection Regimes (1991-2000). *Journal of Geophysical Research*, 108, C11, 3354.

Boyd, P.W., Strzepek, R., Takeda, S., Jackson, G., Wong, C.S., McKay, R.M., Law, C., Kiyosawa, H., Saito, H., Sherry, N., Johnson, K., Gower, J., Ramaiah, N. 2005. The evolution and termination of an iron-induced mesoscale bloom in the northeast subarctic Pacific. *Limnology and Oceanography*, 50 (6), pp. 1872-1886.

Campbell, R.W., Head, E.J.H. 2000. Egg production rates of Calanus finmarchicus in the western North Atlantic: effect of gonad maturity, female size, chlorophyll concentration and temperature. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* 57: 518-529.

Campbell, R.W., Head, E.J.H. 2000. Viability of C. finmarchicus eggs *in situ*: do intact diatoms reduce hatching success? ICES *J. Mar. Sci.* 57: 1780-1785.

Cota, G.F., Harrison, W.G., Platt, T., Sathyendranath, S. et Stuart, V. 2003. Bio-optical properties of the Labrador Sea. *J. Geophys. Res.* 108, C7, 3228: 21-1 – 21-14.

Denman, K.L., 2003. Modelling planktonic ecosystems: parameterizing complexity, *Progress in Oceanography*, 57, 429-452.

Denman, K.L., et Peña, M.A. 2002. The response of two coupled 1-D mixed layer /planktonic ecosystem models to climate change in the NE Subarctic Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II*, 49, 5739-5757.

Denman, K.L., Voelker, C. Peña, M.A. et Rivkin, R.B. 2006. Modelling the ecosystem response to iron fertilization in the subarctic NE Pacific: The influence of grazing, and Si and N cycling on CO_2 drawdown, *Deep-Sea Research II*, 53, 2327-2352.

Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Millero,F.J., Lamb,M.F.,Greeley,D., Bullister, J.L., Key,R.M. Peng,T.-H., Kozyr,A. Ono,T. et Wong, C.S. 2002. *In situ* calcium carbonate dissolution in the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1144, doi:10.1029/2002GB001866.

Harrison, W.G., Aristegui,J., Head, E.J.H., Li, W.K.W., Longhurst, A.R. et Sameoto, D.D. 2001. Basin-scale variability in plankton biomass and community metabolism in the sub-tropical North Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part II* 48, 2241-2269.

Head, E.J.H., Harris, L.R., Campbell, R.W. 2000. Investigations on the ecology of *Calanus* spp. in the Labrador Sea. I. Relationship between the phytoplankton bloom and reproduction and development of *Calanus finmarchicus* in spring. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 193: 53-73.

Head, E.J.H., Harris, L.R. , Yashayaev,I. 2003. Distributions of *Calanus* spp. and other mesozooplankton in the Labrador Sea in relation to hydrography in spring and summer (1995–2000). *Progress in Oceanography* 59, 1–30.

Heath, M.R., Boyle, P.R., Gislason, A., Gurney, W.S.C., Hay, S.J., Head, E.J.H., Holmes, S., Ingvarsdóttir, A., Jonasdóttir, S.H., Lindeque, P., Pollard, R.T., Rasmussen, J., Richards, K., Richardson, K., Smerdon, G., Spiers, D. 2004. Comparative ecology of overwintering *Calanus finmarchicus* in the northern North Atlantic and implications for life cycle patterns. *ICES J. Mar. Sci.* 61: 698-708.

Higuchi, K., Chan, Y.-H., Yuen, C.W., Wong, C.S. 2000. Doubled CO_2 impact on subarctic marine carbon cycle: A case study at Ocean Station P. *Marine Chemistry*, 72 (2-4), pp. 273-295.

Johnson, W.K., Miller, L.A., Sutherland, N.E., Wong, C.S. 2005. Iron transport by mesoscale Haida eddies in the Gulf of Alaska. *Deep-Sea Research Part II*, 52 (7-8), pp. 933-953.

Jones, E.P. 2001. Circulation in the Arctic Ocean. *Polar Research* 20 (2), 139–146. doi:10.1111/j.1751-8369.2001.tb00049.x.

Law, C.S., Crawford, W.R., Smith, M.J., Boyd, P.W., Wong, C.S., Nojiri, Y., Robert, M., Abraham, E.R., Johnson, W.K., Forsland, V., Arychuk, M. 2006. Patch evolution and the biogeochemical impact of entrainment during an iron fertilisation experiment in the sub-Arctic Pacific. *Deep-Sea Research Part II*, 53 (20-22), pp. 2012-2033.

Li, W. K. W. et Harrison, W. G. 2001. Chlorophyll, bacteria and picophytoplankton in ecological provinces of the North Atlantic. *Deep Sea Research Part II* 48, 2271-2293.

Li, William K. W., Harrison, W. G., Head, E. J. H. 2006. Coherent Sign Switching in Multiyear Trends of Microbial Plankton. *Science* 311:1157-1160.

Losa, S. N., Vézina,A. Daniel Wright,D., Lu,Y., Thompson,K. et Dowd,M. 2006. 3D ecosystem modelling in the North Atlantic: Relative impacts of physical and biological parameterizations. *Journal of Marine Systems* 61 (2006) 230–245.

Matear, R.J, Wong,C.S. et Xie,L. 2003. Can CFCs be used to determine anthropogenic CO_2? *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1013, doi:10.1029/2001GB001415.

Monahan, A.H., et Denman, K.L. 2004. Impacts of atmospheric variability on a coupled upper-ocean/ecosystem model of the subarctic Northeast Pacific, Global *Biogeochemical Cycles*, 18, GB2010, doi: 10.1029/2003GB002100.

Pahlow M., Vézina A.F., 2003. Adaptive model of DOM dynamics in the surface ocean. *Journal of Marine Research* 61, 127-146.

Sabine, C.L., R.A. Feely, R.A., Gruber, N.,Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T. et Rios,A.F. 2004. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2. *Science* 305, 367-371.

Steiner, N., K. Denman, K., McFarlane,N. et Solheim,L. 2006. Simulating the coupling between atmosphere-ocean processes and the planktonic ecosystem during SERIES. *Deep-Sea Research II*, 53, 2434-2454.

Stuart, V., Sathyendranath, S., Head, E.J.H., Platt, T., Irwin, B. Maass, H. (2000) Bio-optical characteristics of diatom and prymnesiophyte populations in the Labrador Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 201: 91-106.

Swift, J.H., Jones, E.P., Aagaard, K., Carmack, E.C., Hingston, M., MacDonald, R.W., McLaughlin,F.A. et Perkin, R.G. 1997. Waters of the Makarov and Canada basins. *Deep Sea Research Part II* 44, 1503-1529.

Tait, V.K., Gershey,R.M. et Jones,E.P. 2000. Inorganic carbon in the Labrador Sea: Estimation of the anthropogenic component. *Deep Sea Research* I 47, 295-308.

Tian, R. C., Deibel, D., Rivkin,R. B. et Vezina,A.F. 2004. Biogenic carbon and nitrogen export in a deep-convection region: simulations in the Labrador Sea. *Deep-Sea Research* I 51, 413–437.

Timothy, D.A., Wong, C.S., Nojiri, Y., Ianson, D.C., Whitney, F.A. 2006. The effects of patch expansion on budgets of C, N and Si for the Subarctic Ecosystem Response to Iron Enrichment Study (SERIES). *Deep-Sea Research Part II*, 53 (20-22), pp. 2034-2052.

Tishchenko, P.Ya., Chichkin, R.V., Il'ina, E.M., Wong, C.S. 2000. The measurement of pH values in seawater using a cell without a liquid junction. *Oceanology*, 42 (1), pp. 27-35.

Tsunogai, S., Wong, C.S. 2000. Second international symposium on carbon dioxide in the oceans, Tsukuba, Japan (January 1999). *Marine Chemistry*, 72 (2-4), pp. 79-81.

Wanninkhof, R., Peng, T.-H., Huss, B., Sabine, C.L., Lee, K., Azetsu-Scott, K., Bullister, J.L., Feely, R.A., Hoppema, M., Key, R.M., Kozyr, A., Millero,F.J. et Rios, A.F. (2003) Comparison of inorganic carbon system parameters measured in the Atlantic Ocean from 1990 to 1998. Environ. Sci. Div. Pub. No. 4988, US Dept. of Energy, CDIAC, Oak Ridge Tenn., ORNL/CDIAC-116, 41pp., Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent. Oak Ridge Natl. Lab., U.S. Dept. Of Energy, Oak Ridge Tenn.

Whitney, F.A., Freeland, H.J. et Robert,M. 2007. Persistently declining oxygen levels in the interior waters of the eastern subarctic Pacific. *Progress in Oceanography* 75, 179–199.

Whitney, F.A., Wong, C.S., Boyd, P.W., 1998. Interannual variability in nitrate supply to surface waters of the Northeast Pacific Ocean. *Marine Ecology Progress Series* 170, 15–23.

Wong, C.S. et Matear, R.J. 1999. Sporadic silicate limitation of phytoplankton productivity in the subarctic NE Pacific. *Deep Sea Research Part II* 46, 2539-2555.

Wong, C.S. et Chan, Y.-H. 1991. Temporal variations in the partial pressure and flux of CO_2 at Ocean Station P in the subarctic Northeast Pacific Ocean. *Tellus* 43, 206-223.

Wong, C.S. et Crawford, D.W. 2002. Flux of particulate inorganic carbon to the deep subarctic Pacific correlates with El Nin. *Deep-Sea Research Part II*, 49 (24-25), pp. 5705-5715.

Wong, C.S. et Crawford, D.W. 2006. Evolution of phytoplankton pigments in an in-situ iron enrichment experiment in the subarctic NE Pacific. *Deep-Sea Research Part II*, 53 (20-22), pp. 2152-2167.

Wong, C.S., Johnson, W.K., Sutherland, N., Nishioka, J., Timothy, D.A., Robert, M., Takeda, S. 2006. Iron speciation and dynamics during SERIES, a mesoscale iron enrichment experiment in the NE Pacific. *Deep-Sea Research Part II*, 53 (20-22), pp. 2075-2094.

Wong, C.S. et Matear, R.J. 1996. Effects of circulation and mixing on the disposal of CO_2 in the North Pacific. *Energy Conversion and Management*, 37 (6-8), pp. 1007-1012.

Wong, C.S., Waser, N.A.D., Nojiri, Y., Whitney, F.A., Page, J.S. et Zeng, J. 2002. Seasonal cycles of nutrients and dissolved inorganic carbon at high and mid-latitudes in the North Pacific Ocean during the Skaugran cruises: Determination of new production and nutrient uptake ratios. *Deep-Sea Research Part II*, 49 (24-25), pp. 5317-5338.

Wong, C.S., Waser, N.A.D., Whitney, F.A., Johnson, W.K. et Page, J.S. 2002. Time-series study of the biogeochemistry of the North East subarctic Pacific: Reconciliation of the Corg/N remineralization and uptake ratios with the Redfield ratios. *Deep-Sea Research Part II*, 49 (24-25), pp. 5717-5738.

Wong, C.S., Whitney, F.A., Iseki, K., Page, J.S. et Zeng, Jiye, 1995. Analysis of trends in primary productivity and chlorophyll-a over two decades at Ocean Station P (50 degrees N, 145 degrees W) in the subarctic Northeast Pacific Ocean. In R.J. Beamish (ed.) Climate change and northern fish populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 121, 107-117.

Wong, C.S., Wong, S.E., Richardson, W.A., Smith, G.E., Arychuk, M.D. et Page, J.S. 2005. Temporal and spatial distribution of dimethylsulfide in the subarctic Northeast Pacific Ocean: A high-nutrient-low-chlorophyll region. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 57 (4), pp. 317-331.

Wong, C.S., Yu, Z., Waser, N.A.D., Whitney, F.A., et Johnson, W.K. 2002. Seasonal changes in the distribution of dissolved organic nitrogen in coastal and open-ocean waters in the North East Pacific: Sources and sinks. *Deep-Sea Research Part II*, 49 (24-25), pp. 5759-5773.

Zahariev, K., Christian, J. et Denman,K. 2007. A global ocean carbon model withnovel parameterizations of iron limitation, calcification and N_2 fixation: preindustrial, historical, and fertilization simulations. *Progress in Oceanography*, sous presse, December, 2007.

Zeng, J., Nojiri, Y., Murphy, P.P., Wong, C.S. et Fujinuma, Y. 2002. A comparison of pCO_2 distributions in the northern North Pacific using results from a commercial vessel in 1995-1999. *Deep-Sea Research Part II*, 49 (24-25), pp. 5303-5315.

CHAPITRE 5

Les émissions de gaz à effet de serre issues d'aménagements hydroélectriques au Canada

Auteur coordonnateur | **L. Braithwaite**

Auteur principal | **H. Hengeveld**

Contributeur
R. Hesslein

5.1 Introduction

Comme on le disait au chapitre 1, les milieux humides de la planète constituent un important réservoir de carbone. Considérés globalement, ils agissent comme un puits net de carbone. Cependant, comme la décomposition de la biomasse s'y réalise largement dans des conditions anaérobies, les milieux humides sont aussi une importante source naturelle de méthane. Les contributions relatives des milieux humides individuels comme sources et puits de gaz à effet de serre sont fonction d'un ensemble de facteurs physiques et biologiques, notamment de la température et du niveau des nappes phréatiques.

Les activités de changement des utilisations des terres peuvent modifier la contribution des milieux humides comme sources et puits de gaz à effet de serre. Par exemple, les marécages drainés peuvent devenir d'importantes sources de CO_2 du fait que le réservoir de carbone s'y trouve exposé à l'oxydation. Cependant, l'abaissement de la nappe phréatique découlant du drainage a aussi pour effet de réduire la décomposition anaérobie, qui émet du méthane. En revanche, l'inondation des milieux humides peut accroître la production de méthane.

C'est dans ce contexte qu'au début des années 1990, des experts ont pour la première fois formulé l'avertissement que l'inondation d'écosystèmes pour la production d'hydroélectricité pourrait créer une nouvelle source importante d'émissions de gaz à effet, surtout dans les régions tropicales et dans le cas de réservoirs très peu profonds (Rudd, 1993; Gagnon et Chamberland, 1993; Svennsson et Ericson, 1993; Galy-Lacaux, 1999). L'accroissement des émissions de méthane en découlant est dû à la décomposition anaérobie de la biomasse inondée durant le remplissage des réservoirs hydroélectriques, une grande partie du méthane formé s'échappant dans l'atmosphère. De fait, certains spécialistes soutiennent que les émissions de gaz à effet de serre de certains réservoirs hydroélectriques pourraient être comparables, par unité d'énergie produite, à celles issues des centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles.

Selon des études récentes, ce problème demeure préoccupant. Certains experts ont avancé que les émissions des 52 000 plus grands réservoirs du monde pourraient atteindre 100 millions de tonnes métriques, ce qui correspond à peu près aux émissions de toutes les milieux humides naturels de la Terre. Certains de ces réservoirs pourraient constituer des sources de gaz à effet de serre aussi importantes que les centrales thermiques à combustibles fossiles qu'ils remplacent. Par exemple, bien que les estimations des émissions moyennes de gaz à effet de serre des réservoirs hydroélectriques brésiliens, établies au moyen d'une analyse du cycle de vie entier, demeureraient inférieures, par kWh

produit, aux émissions qui seraient rejetées par des centrales à turbines au gaz naturel à cycle combiné dont l'efficacité est de 50 % (dos Santos *et al.*, 2004), les complexes hydroélectriques à faible densité de puissance (faible quantité d'énergie produite par unité de surface du réservoir) émettent à peu près autant de GES que les centrales à turbines au gaz naturel à cycle combiné. Plus particulièrement, les réservoirs peu profonds à fond plat produisent de fortes émissions. En outre, la plupart de ces études, centrées sur l'effet de l'inondation sur les émissions de méthane, n'ont pas examiné adéquatement l'effet de ces réservoirs sur le flux net de CO_2 ou les émissions d'oxyde de diazote (Fearnside, 2002, 2004; UNESCO, 2006; Delmas, 2005; GIEC, 2007; Lima, 2007).

D'autres chercheurs ont établi que les réservoirs hydroélectriques des latitudes nordiques produisent beaucoup moins de gaz à effet de serre que ceux des basses latitudes. Ils ont aussi observé que la majeure partie des émissions y sont produites dans les dix premières années suivant l'inondation. Après cette première décennie, les émissions de GES tendent à décroître pour devenir comparables à celles des lacs naturels de latitude similaire. En outre, ces chercheurs soutiennent qu'une grande partie des terres inondées pour former ces réservoirs nordiques étaient des milieux humides qui émettaient déjà du méthane. De plus, l'inondation de ces milieux humides pourrait en fait réduire l'émission de méthane en faisant en sorte qu'une bonne partie du méthane issu du fond du réservoir se trouve oxydé en dioxyde de carbone dans les eaux du réservoir avant d'atteindre la surface. Ainsi, quand on calcule les émissions nettes, il appert que l'inondation aux fins de la production d'hydroélectricité peut entraîner une réduction des émissions nettes de méthane. Par ailleurs, les installations hydroélectriques au fil de l'eau émettent nettement moins de GES que les grands réservoirs des barrages hydroélectriques. On remarque aussi que, sous de basses latitudes du même ordre, les réservoirs profonds produisent généralement moins d'émissions que les réservoirs peu profonds (Tremblay, 2005; Huttunen, 2005; dos Santos, 2005).

Enfin, les réservoirs hydroélectriques ont aussi une incidence sur les flux de CO_2. On a observé que certains réservoirs absorbent du CO_2 atmosphérique, mais la plupart en émettent en petite quantité du fait que du carbone passe dans l'eau dans le cadre du cycle naturel du carbone (Tremblay, 2005).

Les conclusions générales de ces études indiquent que, pour la plupart des installations hydroélectriques, on peut s'attendre à ce que les émissions nettes de GES soient faibles relativement à celles des centrales thermiques à combustibles fossiles qu'elles remplacent. Cependant, les émissions peuvent varier de façon importante d'un réservoir à l'autre. En outre, obtenir des mesures précises de la portion des émissions de GES associée à la création des réservoirs d'eau douce et en faire état correctement demeurent une tâche difficile (GIEC, 2007; UNESCO, 2006).

Cette question est importante pour les Canadiens. De grands réservoirs hydroélectriques ont été créés dans les dernières décennies, et d'autres sont prévus. On suppose que la plupart des réservoirs projetés ne devraient avoir aucune incidence sur les émissions de GES, c'est—à-dire qu'ils ne devraient ni réduire ni accroître les émissions nettes. Toutefois, des résultats de recherche indiquent que les réservoirs canadiens des régions boréales, pour lesquels les ratios surface:volume sont élevés, d'où l'inondation de quantités considérables de biomasse, pourraient émettre l'équivalent d'environ 20 à 60 kilotonnes (kT) de CO_2 par TWh d'énergie produite. Bien que ces émissions ne représentent qu'environ 5 % de celles des centrales thermiques à combustibles fossiles (~500 à 1200 kT CO_2 par TWh), il s'agit là d'un facteur qui doit être pris en considération dans l'établissement des politiques énergétiques (Duchemin, 2002).

C'est dans ce contexte que le BRDE a demandé au comité directeur du PON du programme Amélioration des puits de gaz à effet de serre d'inclure dans ses activités de recherche un programme visant à renforcer la recherche canadienne sur les émissions des réservoirs hydroélectriques. Les objectifs officiels fixés pour le PRDE ont été les suivants :

- *mieux comprendre les processus influant sur les flux de gaz à effet de serre associés aux réservoirs hydroélectriques;*
- *élaborer des méthodes pour quantifier avec précision les changements des flux nets survenant après l'aménagement d'installations hydroélectriques;*
- *communiquer aux décideurs l'information obtenue, qui leur servira de base scientifique dans l'élaboration d'options pour les programmes d'atténuation des émissions de GES.*

5.2 Programme de recherche du PRDE concernant les émissions de gaz à effet de serre issues des réservoirs hydroélectriques

En réponse à la demande ci-dessus formulée par le groupe du PRDE, le comité directeur du NOF 6.2 du programme Amélioration des puits de gaz à effet de serre a proposé la stratégie de recherche suivante :

- **Mesurer les flux associés à des petits réservoirs (zones inondées) et à des paysages naturels non inondés** dans la région des lacs expérimentaux (RLE). Ce projet devait examiner les effets à l'échelle de l'écosystème et les émissions de GES associés à l'inondation de milieux humides et de terrains hauts boisés dans la région du Bouclier canadien.

- **Élaborer une méthodologie et un modèle permettant d'inventorier avec précision les flux de GES dans les systèmes hydroélectriques.** Ce projet devait viser la réalisation d'un inventoriage et d'un programme de surveillance exhaustifs des GES, en collaboration avec les sociétés hydroélectriques.

- **Procéder à la modélisation prédictive des flux de GES selon le type et la taille des zones inondées et la durée de l'inondation.** Des modèles détaillés pour la simulation des changements des flux de GES découlant de l'inondation devaient être élaborés à partir des résultats des études intensives sur les expériences d'inondation menées dans la RLE, puis mis à l'échelle de façon à pouvoir s'appliquer aux vastes réservoirs étudiés avec les sociétés hydroélectriques.

L'Institut des eaux douces du MPO a reçu du PRDE des ressources pour ce programme de recherche entre 2000 et 2007, avec pour mandat de le mettre en œuvre et de veiller à l'atteinte de ses objectifs.

Les chercheurs de l'Institut des eaux douces ont d'abord tenu des consultations étendues avec des collègues d'autres pays et les partenaires du projet pour asseoir le plan de recherche sur de bonnes bases. Les consultations ont été les suivantes :

- Discussions avec Hydro-Québec sur la situation des mesures des émissions de GES pour ses réservoirs.

- Rencontres avec des entrepreneurs travaillant à contrat pour BC Hydro afin d'évaluer l'état des connaissances sur les GES pour les réservoirs de BC Hydro et de recommander un programme d'évaluation des GES pour ces réservoirs.

- Atelier sur les expériences d'inondation dans la RLE, auquel ont participé les principaux partenaires, soit le MPO, Manitoba Hydro, Hydro-Québec, BC Hydro, l'Université de l'Alberta et l'Université de Waterloo.

- Négociations avec Manitoba Hydro et leurs consultants concernant les travaux de terrain nécessaires pour estimer les flux de GES à trois endroits pressentis pour de futurs aménagements hydroélectriques.

- Collaboration avec le ministère de l'Environnement pour élaborer des méthodes associées pour l'inventaire national des GES.

Ces consultations ont aidé à l'élaboration d'un plan de travail pertinent pour la période de financement du PRDE 2000-2005. Un atelier sur les travaux menés dans la RLE a par la suite été tenu annuellement, auquel ont participé des partenaires importants, comme Manitoba Hydro, Hydro-Québec, BC Hydro, l'Université de l'Alberta et l'Université de Waterloo, ce qui a permis de modifier le plan de travail selon les besoins dans un contexte de collaboration. Une fois le premier cycle de financement du PRDE terminé, en 2005, le plan a été prolongé jusqu'en mars 2007.

Les activités menées dans le cadre de ce programme et les résultats obtenus sont présentés dans les sections suivantes.

5.2.1 Études menées dans la région des lacs expérimentaux

5.2.1.1 Études de surveillance et études sur les processus

La région des lacs expérimentaux (RLE), où a été réalisée une grande part des recherches sur les émissions des réservoirs financées par le PRDE, se trouve dans le bouclier précambrien dans le nord-ouest de l'Ontario, à environ 250 km à l'est de Winnipeg et 50 km à l'est-sud-est de Kenora. La RLE comprend 58 petits lacs (superficies de 1 à 84 ha) avec leurs bassins versants, où l'on effectue des expériences de manipulation panlacustre, ainsi que trois tronçons de cours d'eau additionnels. Ce site de recherche est exploité depuis 1968 et est géré par l'entremise d'une entente conjointe entre les gouvernements du Canada et de l'Ontario. Avec ses bâtiments permanents abritant des laboratoires modernes, des commodités domiciliaires et des services de soutien, la RLE constitue un lieu unique où les biologistes et autres scientifiques peuvent effectuer des recherches expérimentales dans la nature, plutôt qu'en laboratoire. De petits lacs entiers peuvent être utilisés pour vérifier des hypothèses concernant les écosystèmes d'eau

douce. De plus, la présence de laboratoires sur place permet de réaliser rapidement divers travaux d'analyse sur les échantillons recueillis (eau, zooplancton, poisson, etc.).

Ce lieu de recherche est également idéal pour la création de petits réservoirs permettant d'étudier ce qui se passe dans les suites des inondations. L'avantage que présentent les expériences réalisées dans la RLE est la possibilité de prendre des mesures dans des conditions contrôlées avant, durant et après l'inondation. Bien que les réservoirs qui y sont créés soient beaucoup plus petits que les réservoirs hydroélectriques, ils constituent de bons modèles des zones peu profondes des grands réservoirs industriels, qui échangent des eaux avec les zones plus profondes. Ils fournissent donc des renseignements utiles pour la conception des aménagements hydroélectriques en permettant de prévoir les répercussions du remplissage et de la vidange des réservoirs. L'émission de GES est l'un des effets de l'inondation qui peuvent être étudiés.

Les chercheurs de la RLE ont déjà construit de grands ouvrages d'endiguement dans différents types de zones boisées (allant de broussailles de pins à des forêts sèches) au début des années 1990. Ces structures leur ont permis de simuler la création de réservoirs comme ceux associés aux barrages hydroélectriques - par inondation, ainsi que le retrait saisonnier des eaux. Ce programme de la RLE est connu sous le nom de Projet de réservoirs dans la région des lacs expérimentaux. Dans ce projet, la principale zone d'étude est le grand réservoir L979, complexe de milieux humides boréaux de 16,8 ha qui comprend un bassin central et dont la végétation est dominée par des sphaignes et l'épinette noire.

Toutefois, les grands réservoirs hydroélectriques inondent aussi des forêts sises en terrain haut ainsi que des tourbières. Les terrains hauts présentent des sols et une végétation nettement différentes, et donc des quantités différentes de carbone organique stocké. C'est pourquoi on a entrepris en 1999 un projet complémentaire portant sur les hautes terres inondées (FLUDEX, pour FLooded UplanD EXperiment), mené à trois sites de la région des lacs expérimentaux. Ces sites comprennent une zone de forêt humide renfermant une forte quantité de carbone stocké, une zone de forêt sèche (quantité moyenne de carbone) et une zone de forêt très sèche (pauvre en carbone).

L'apport financier du PRDE a permis une importante expansion des recherches à partir de 2000. Cette année-là, les chercheurs ont commencé à prélever des échantillons deux fois par semaine dans la région du bassin central du réservoir L979 pour y analyser les concentrations de CO_2 et de CH_4. En collaboration avec des chercheurs de l'Université de l'Alberta, des mesures détaillées des concentrations de CO_2 ont également été prises aux trois réservoirs du projet FLUDEX. Enfin, pour comparaison, les concentrations de CO_2 et de CH_4 d'échantillons prélevés dans des lacs de référence non perturbés de taille similaire ont été mesurées. Le prélèvement des échantillons a été accompagné d'une surveillance chimique et biologique des lacs. De plus, des mesures de la production primaire des lacs et réservoirs ont été prises pour aider à interpréter les flux de GES naturels observés.

Dans les années subséquentes, de nouveaux sites ont été ajoutés au réseau des sites de la RLE où sont régulièrement recueillies des données sur les GES, le total actuel de 17 lacs ayant été atteint en 2004.

Pour tirer parti des données des programmes menés antérieurement dans la RLE (dont certains remontent à 1973), toutes les données historiques concernant les concentrations de CO_2 et de méthane et la fixation du CO_2 par les algues qui y ont été recueillies ont aussi été compilées.

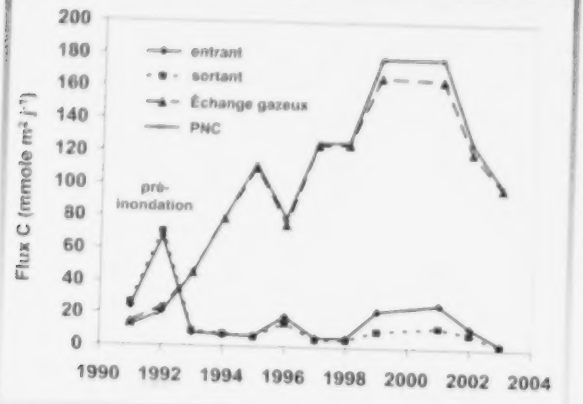
En plus de servir à l'échantillonnage des réservoirs et des lacs de la RLE, les ressources du PRDE sont utilisées par les chercheurs pour élaborer des instruments de surveillance des flux de GES en continu. Une importante avancée technique a ainsi été réalisée en 2005-2006, avec l'installation de détecteurs de méthane pour la mesure des gaz dissous à distance et en continu. Cette avancée a permis une bien meilleure détermination du cycle du méthane dans l'eau douce et une meilleure connaissance des facteurs régissant la production de méthane. La mise au point du détecteur de méthane a permis de concevoir une chambre flottante pour la surveillance continue des flux de bulles, type de flux qui semble être une composante importante du flux de méthane mais pas du flux de carbone.

En partie parce que le financement du programme par le PRDE prenait fin, 2006-2007 a marqué la dernière période d'observation intensive des flux de GES pour le grand réservoir du Projet de réservoirs dans la région des lacs expérimentaux. Ces données ont été recueillies au terme de 12 années d'inondation saisonnière et pourraient servir de point de départ à une étude sur le rétablissement d'un écosystème après perturbation. L'accord de mise en œuvre de la RLE prévoit le démantèlement du barrage existant et le rétablissement du régime d'écoulement naturel à la fin de cette étude.

5.2.1.2 Analyses des données recueillies dans la RLE

Émissions de CO_2. Comme la question principale en ce qui concerne le flux de GES associé aux réservoirs est le bilan atmosphérique net (source nette ou puits net de GES), on doit calculer les flux annuels nets de GES. Ces calculs doivent porter sur les flux de GES entre le réservoir et l'atmosphère pour l'ensemble des saisons, et couvrir le système entier (avec les lacs d'aval et les eaux d'amont). Par exemple, dans le calcul de la production nette de CO_2 (PNC) pour un plan d'eau donné, on doit tenir compte de l'exportation de CO_2 vers l'aval (débit d'eau sortant du plan d'eau multiplié par la quantité de CO_2 dans cette eau), de l'importation de CO_2 depuis l'amont (débit d'eau entrant multiplié par la quantité de CO_2 dans cette eau) et du transfert net de gaz entre le plan d'eau et l'atmosphère. Cette dernière composante doit être calculée au moyen d'un modèle de flux gazeux comportant un coefficient de transfert de masse qui est fonction de la vitesse du vent. Les flux de CO_2 sont aussi largement tributaires de la température et de la présence ou de l'absence de glace et de couverture nivale. Le fait que ces facteurs varient constamment rend le calcul complexe.

FIGURE 5.1



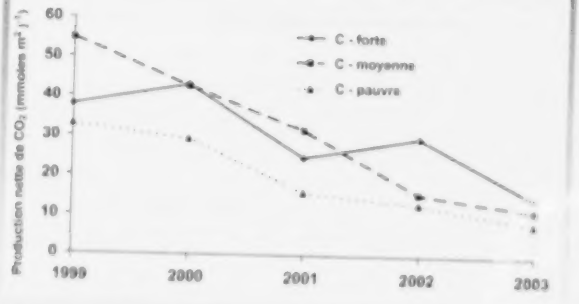
Tendances des flux de CO_2 au site L979 du Projet de réservoirs dans la région des lacs expérimentaux entre 1990 (période pré-inondation) et 2003. On remarque que les valeurs des flux de carbone entrant dans le réservoir depuis les sources d'amont et sortant du réservoir vers les réservoirs d'aval sont faibles et du même ordre. Il en découle que le flux de carbone sous forme de CO_2 depuis le réservoir vers l'atmosphère (échange gazeux) correspond étroitement à la production nette de CO_2. La masse d'une mole de carbone est de 12 grammes. Source : Hesslein, 2007.

La *figure 5.1* montre les résultats de l'analyse des flux de CO_2 pour le système du milieu humide L979 du Projet de réservoirs dans la région des lacs expérimentaux pour la période 1990-2003. On remarque que les émissions ont fortement augmenté durant les dix premières années qui ont suivi l'inondation, puis se sont mises à diminuer par la suite. Les valeurs annuelles montrent que la PNC était d'environ 0,2 à 0,5 kg CO_2 m^{-2} an^{-1} avant l'inondation et est passée à 1,6 kg CO_2 m^{-2} an^{-1} immédiatement après l'inondation.

Dans les trois systèmes des hautes terres du projet FLUDEX, les estimations de la PNC pour la première année suivant l'inondation se situent entre 0,3 et 0,5 kg CO_2 m^{-2} an^{-1}. La PNC y a décru beaucoup plus rapidement dans les années suivantes qu'au site L979, pour se situer entre 0,07 et 0,15 kg CO_2 m^{-2} an^{-1} après cinq ans d'inondation. En comparaison, la PNC pour l'un des lacs de référence non perturbés (lac Rawson) était d'environ 0,04 kg CO_2 m^{-2} an^{-1}.

Les résultats pour les hautes terres sont significativement différents de ceux pour le système de milieu humide. Avant inondation, les sites FLUDEX présentaient un bilan de carbone à long terme relativement bien équilibré, le flux net entre la terre et l'atmosphère se situant autour de zéro. Après inondation, la PNC aux trois sites a significativement augmenté pour atteindre des niveaux similaires à ceux observés au site L979. Il est surprenant de constater que la PNC était similaire aux trois sites FLUDEX, qui présentent pourtant des teneurs en carbone différentes. La PNC aux sites FLUDEX a augmenté significativement durant la première année après l'inondation mais, contrairement à ce qui a été observé au site L979, elle a diminué notablement

FIGURE 5.2



Tendances de la PNC après inondation des trois sites FLUDEX. La masse d'une mole de CO_2 est de 44 grammes. Source : Hesslein, 2007.

durant les quelques années suivantes (*figure 5.2*). Les analyses isotopiques laissent penser que la principale source de la PNC était la biomasse inondée dans ces réservoirs plutôt que l'apport extérieur de carbone organique dissous (Bodaly, 2004; Matthews, 2005).

Les résultats de PNC tant pour le site L979 que pour les sites FLUDEX paraissent logiques. Pour qu'un plan d'eau puisse présenter une production nette de dioxyde de carbone positive, il doit recevoir plus de carbone organique (qui se décompose pour former du CO_2) qu'il en perd. Dans les vieux lacs, il se fait une accumulation des sédiments, de telle sorte qu'à moins d'un apport net de carbone organique de l'extérieur, ces lacs constituent des puits naturels nets de carbone et devraient présenter une PNC négative. Quand il y a un important apport net de carbone sous la forme de carbone organique dissous (COD) issu des eaux du bassin versant, une bonne partie de ce carbone floculе et se retrouve dans les sédiments. Une portion de ce dernier est transformé en CO_2 par les bactéries présentes dans les sédiments, d'où le flux net de CO_2 vers l'atmosphère. Dans les réservoirs artificiels, la matière organique présente dans les terres nouvellement inondées constitue une nouvelle source de carbone organique qui peut donner lieu à une importante PNC. Au fur et à mesure que cette nouvelle source de carbone s'épuise, le potentiel de PNC diminue. Cependant, comme les expériences réalisées dans la RLE l'ont montré, ces réservoirs peuvent continuer de produire davantage de CO_2 qu'avant leur inondation pendant plus de dix ans.

Émissions de méthane. Les études réalisées dans la RLE montrent que les îles flottantes de tourbe, qui montent jusqu'à la surface du réservoir sous l'effet de flottaison des gaz piégés dans la tourbe, sont des sources importantes d'émissions de méthane. Ces îles flottantes de tourbe sont aussi observées dans les grands réservoirs hydroélectriques, et sont donc un élément important.

Dans l'étude principale réalisée dans la RLE au site L979, la surface tourbeuse non perturbée ne constituait qu'une faible source de CH_4 atmosphérique (environ 1 mg CH_4 m^{-2} an^{-1}) avant l'inondation. Ces faibles flux de CH_4 étaient probablement en partie attribuables à l'oxydation se produisant dans l'épaisse couche insaturée présente dans l'ensemble de la tourbière.

En 1995, deux ans après l'inondation initiale, le flux moyen issu d'une grande île flottante de tourbe se trouvant au centre du complexe de milieu humide était de 280 mg de méthane par m^2 par jour. Sept ans plus tard, le flux n'avait que légèrement diminué, à 269 ± 88 mg CH_4 m^{-2} an^{-1}. Ce flux est plus de 200 fois supérieur à celui issu de la surface de la tourbe non perturbée. Cet accroissement par rapport aux conditions pré-inondation est probablement dû à l'oxydation réduite du méthane produit liée au niveau élevé de l'eau dans la masse de tourbe flottante. Le flux issu de la surface d'eau libre du milieu inondé était de 87 ± 19 mg CH_4 m^{-2} an^{-1}, soit environ trois fois moindre que celui issu de l'île de tourbe. D'autres îles flottantes produisent des émissions encore plus élevées (Scott *et al.*, 1999). Les émissions varient aussi beaucoup en fonction de la température : elles diminuent rapidement à l'automne avec la baisse de la température et sont minimes durant l'hiver quand la tourbière est couverte de glace (Saquet, 2003; Hesslein, 2007).

Si on fait le total des valeurs élevées pour les émissions issues de la tourbière du site L979 et des valeurs pour les zones d'eau libre du réservoir pour l'ensemble de la période d'eau libre de 2002, on obtient pour les 16,8 ha du réservoir des émissions moyennes d'environ 45 kg CH_4 m^{-2}. Plus de 60 % de ces émissions seraient attribuables des masses de tourbe flottantes (Saquet, 2003). Des études laissent entendre que le taux de décomposition des îles de tourbe serait de moins de 6 % par année. Par conséquent, leurs émissions pourraient demeurer élevées durant au moins deux décennies après l'inondation (St. Louis, 2003).

Les flux nets de méthane étaient moins élevés aux sites FLUDEX qu'au site L979. Contrairement à la PNC, les émissions de méthane se sont accrues progressivement au cours des trois premières années après l'inondation, les bulles de méthane constituant la principale source d'émissions à la troisième saison d'inondation (*figure 5.3*). Ici encore, les émissions étaient similaires aux trois différents sites se distinguant par la quantité de carbone stocké dans le réservoir (Bodaly, 2004; Matthews, 2005).

Émissions d'oxyde de diazote. Les chercheurs ont également analysé les concentrations d'oxyde de diazote dans les échantillons recueillis aux sites FLUDEX. L'oxyde de diazote est issu de la dénitrification se produisant dans les sols et milieux humides boréaux, et s'inscrit donc dans le cycle de l'azote plutôt que dans celui du carbone. Bien qu'on se soit attendu à ce que l'inondation puisse accroître la production de N_2O, les résultats obtenus aux sites FLUDEX laissent penser le contraire. Les données ont montré que les concentrations de N_2O dans les eaux de surface du réservoir étaient en fait inférieures à celles mesurées dans l'atmosphère, cette sous-saturation allant en s'accroissant vers le fond. Il appert donc que l'inondation ait fait du

milieu un petit puits d'oxyde de diazote. Les chercheurs pensent que le phénomène serait dû à la conservation de l'azote dans la biomasse inondée (qui dans cette région est faible en azote) tandis qu'elle se décompose. Les taux de consommation de N_2O ne semblaient pas différer significativement entre les trois réservoirs. Ces résultats sont contraires à ceux d'autres études réalisées dans les régions boréales, selon lesquelles les réservoirs étudiés émettraient une faible quantité d'oxyde de diazote (Bodaly, 2004; Duchemin, 2002; Huttunen, 2002).

5.2.2 Élaboration d'une méthodologie et d'un modèle pour l'inventoriage détaillé des flux de GES dans les systèmes hydroélectriques existants

Bien que des discussions pertinentes aient également eu lieu avec Hydro-Québec et BC Hydro, la majeure partie des recherches financées par le PRDE portant sur les émissions de gaz à effet de serre issues des réservoirs hydroélectriques existants ont été entreprises en collaboration avec Manitoba Hydro. Les activités et résultats associés sont présentés ci-dessous.

5.2.2.1 Surveillance des concentrations de gaz à effet de serre

Depuis 1999, le MPO collabore avec Manitoba Hydro à la conception et à la mise en œuvre d'un réseau d'échantillonnage des concentrations de gaz à effet de serre pour les réservoirs hydroélectriques du Manitoba. L'échantillonnage hebdomadaire par le personnel de Manitoba Hydro a été réalisé pour la première année complète à trois centrales hydroélectriques du fleuve Nelson (Kettle Rapids, Limestone et Long Spruce) en 2000. L'année suivante, le réseau a été étendu pour comprendre en tout 12 importants barrages situés sur le Nelson et les rivières Winnipeg et Saskatchewan. Leurs caractéristiques et leur âge sont présentés au *tableau 5.1*.

Le but de l'échantillonnage hebdomadaire était d'établir une méthode simple mais robuste pour la surveillance régulière des concentrations de GES dans les eaux des réservoirs. Le processus d'échantillonnage a été amélioré durant la troisième année pour corriger certains problèmes liés à l'échantillonnage lui-même, au transport et aux analyses. En 2003, la qualité des données était assurée. Tous les échantillons ont été analysés dans un laboratoire de Winnipeg.

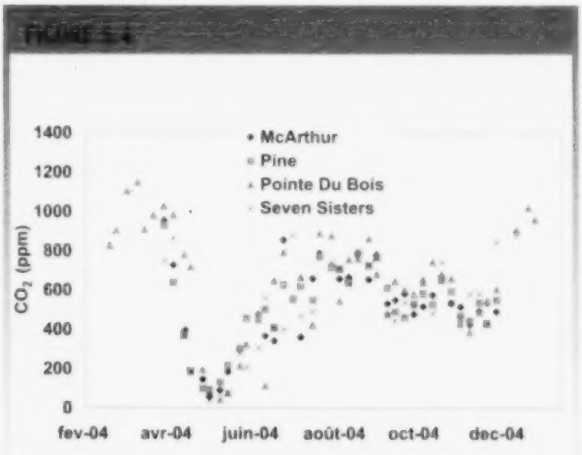
TABLEAU 5.1

Caractéristiques des barrages hydroélectriques du Manitoba. Source : Hesslein, 2003.

	Date de mise en service	Capacité (MW)	Énergie (GWh)	Superficie inondée (km^2)	Énergie / superficie inondée (GWh/km^2)
RÉSEAU FLUVIAL DE LA WINNIPEG					
Seven Sisters	1931/1952	150	1 010	8,4	120,2
McArthur Falls	1955	56	385	8,3	46,4
Great Falls	1928	132	910	3,5	260,0
Pine Falls	1952	82	640	1,1	581,8
Total pour la Winnipeg		**420**	**2 945**	**21**	**138,3**
RÉSEAU FLUVIAL DE LA SASKATCHEWAN					
Grand Rapids	1968	472	1 540	1373	1,1
RÉSEAU FLUVIAL DU NELSON					
Jenpeg	1979	126	910	73	12,5
Kelsey	1961/1972	224	1 800	124	14,5
Kettle	1974	1 272	7 070	236	30,0
Long Spruce	1979	980	6 030	13,7	440,1
Limestone	1992	1 330	7 565	3,1	2440,3
Total pour le Nelson		**3 932**	**23 375**	**450**	**52,0**
RÉSEAU FLUVIAL DU CHURCHILL					
Southern Indian Lake	1976			269	
Notigi Forebay	1976			492	
Total pour le Churchill				**761**	
GRAND TOTAL		**4 834**	**28 800**	**2 635**	**10,9**

En 2000, un prototype d'instrument pour l'analyse continue *in situ* du CO_2 fondé sur l'absorption dans l'infrarouge a aussi été mis à l'essai avec succès au lac Stevens sur le Nelson, ainsi qu'à plusieurs sites dans des réservoirs situés sur la Winnipeg et au lac des Bois (la source naturelle de la Winnipeg). Cet instrument permet de calculer des estimations du CO_2 pour la superficie totale de grands réservoirs (ou lacs) hétérogènes. La première année, on effectuait la surveillance en recueillant des données avec l'instrument sur une période de une heure habituellement. Une version plus petite, plus robuste et plus pratique a été mise à l'essai l'année suivante. Cet instrument est aujourd'hui utilisé par divers organismes responsables de programmes de surveillance du même genre, dont Manitoba Hydro (qui utilise ces appareils à quatre barrages), Hydro-Québec (qui en a construit environ dix pour utilisation dans ses études sur les réservoirs), Canards Illimités, l'Université de l'Alberta, l'Université du Manitoba, le Water Research Institute de Milwaukee, l'Université de Waterloo, et la Division de la recherche sur l'Arctique du MPO.

La *figure 5.4* représente un ensemble d'échantillons des données hebdomadaires recueillies en 2004 aux quatre stations situées sur la Winnipeg. Toutes les stations révèlent un profil saisonnier similaire : sursaturation en CO_2 d'environ 1 100 ppm au début du printemps quand la rivière était encore couverte de glace (concentrations atmosphériques de ~375 ppm); diminution rapide à la fin du printemps jusqu'à des concentrations inférieures à 100 ppm; retour à une



Tendances saisonnières des concentrations de CO_2 pour 2004 à quatre endroits de la rivière Winnipeg. Source : Hesslein, 2007.

sursaturation correspondant à environ deux fois les concentrations atmosphériques à la fin de l'été. Les données issues du système de surveillance en continu concordent bien avec les données des échantillons hebdomadaires.

Les résultats du réseau du fleuve Nelson montrent un profil saisonnier semblable, avec une plage de fluctuation plus étroite : les concentrations atteignaient un maximum d'un peu moins de 1 000 ppm au début du printemps et un minimum d'environ 250 ppm à la fin du printemps. On n'a pas détecté de méthane.

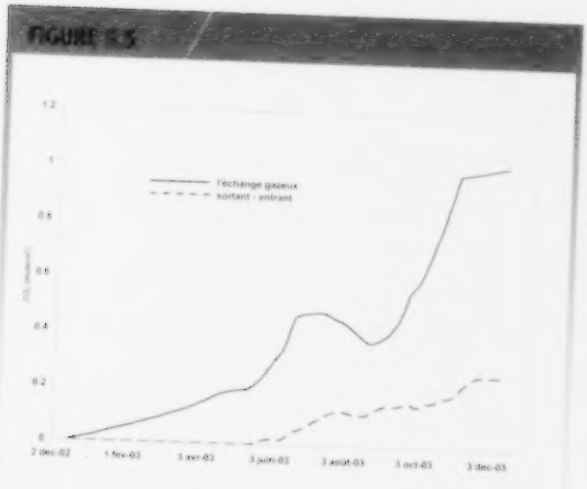
Les grandes variations des concentrations semblent attribuables à la glace, à la température et à l'activité biologique. En hiver, les eaux fluviales sont couvertes de glace et de neige, ce qui réduit grandement le flux de gaz entre l'eau et l'atmosphère. En outre, les eaux sont froides et privées de lumière, ce qui supprime les phénomènes de respiration et de photosynthèse. Il y a alors accroissement de la concentration de CO_2 dans l'eau. Une fois le couvert nival disparu, la lumière, qui peut pénétrer dans l'eau à travers la glace, stimule la croissance des algues. Le CO_2 peut aussi s'échapper vers l'atmosphère dans les zones d'eau libre qui se forment. La croissance des algues consomme du CO_2, et les concentrations du gaz commencent à diminuer vers la mi-avril pour atteindre un minimum vers la mi-mai. Les données montent qu'il y a durant cette période une forte prolifération de diatomées. Cependant, une fois le couvert de glace disparu, la concentration de CO_2 cesse de diminuer, puis commence à augmenter de nouveau pour atteindre le maximum estival de 600-800 ppm vers la mi-juillet. Cette hausse s'explique notamment par le fait que la solubilité du CO_2 dans l'eau diminue avec l'élévation de la température. Les concentrations se mettent alors à fluctuer davantage d'une semaine à l'autre. Avec l'arrivée de l'automne et la baisse de la température, les concentrations de CO_2 dans l'eau commencent à diminuer lentement pour atteindre des niveaux semblables aux concentrations atmosphériques au moment où la glace réapparaît, en novembre.

5.2.2.2 Calcul des émissions de gaz à effet de serre

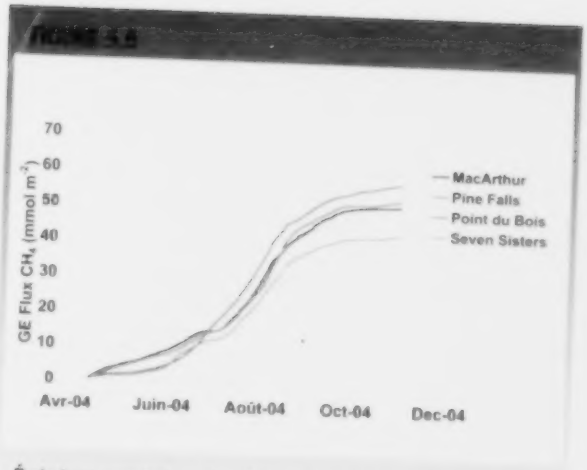
Comme on l'a mentionné dans la section sur l'analyse des données recueillies dans la RLE, le calcul de la PNC pour un plan d'eau donné nécessite de disposer d'information sur les débit entrant et sortant, les concentrations de CO_2 dans ces eaux, et l'échange gazeux entre l'eau et l'atmosphère. Les connaissances existantes des variables pertinentes dans les systèmes hydroélectriques de Manitoba Hydro permettent

d'effectuer une approximation valable des profils annuels de la production nette de CO_2 (avec l'hypothèse que la quantité de CO_2 apportée par le débit entrant est égale à celle retirée par le débit sortant durant la période hivernale où il y a couverture de glace). La PNC totale pour le lac du Bonnet, sur la Winnipeg (*figure 5.5*), correspondant au transport net de CO_2 à l'extérieur du lac a été estimée à environ 1,28 mole m^{-2} an^{-1}.

Cette valeur est très semblable à celles déterminées pour des lacs non perturbés de la RLE, ce qui laisse penser que l'aménagement de cette section de la Winnipeg pour la production d'hydroélectricité n'a pas tellement d'effet à long terme sur la production nette et les émissions de CO_2. La matière organique constituant la source de la PNC est principalement le carbone organique dissous (COD). On peut donc réaliser une estimation indépendante de la PNC pour la Winnipeg au moyen des données sur le COD pour la rivière. Avec cette approche, on obtient pour le lac du Bonnet une PNC de 1,05 mole m^{-2} an^{-1}, valeur très semblable à celles mentionnées plus haut, qui ont été obtenues par mesure directe du CO_2. Cela va dans le sens des résultats des études réalisées dans la RLE (vois plus haut), les barrages responsables de l'inondation des paysages le long de la rivière ayant été construits il y a plus de 50 ans (*voir le tableau 5.1*).



Flux de CO_2 cumulatifs estimés dus à l'échange gazeux et aux débits entrant et sortant pour le lac du Bonnet. Source : Hesslein, 2007.



Émissions cumulatives de méthane issues de la Winnipeg durant la saison 2004. Les résultats indiquent une production totale pour l'année d'environ 0,8 g/m^2, valeur semblable à celle pour les lacs naturels non perturbés. La masse d'une mole de méthane est de 16 grammes. Source : Hesslein, 2007.

Les données sur le méthane recueillies pour les réservoirs hydroélectriques de la Winnipeg montrent que les émissions sont fortement corrélées avec la température. Les concentrations de méthane atteignent sont le plus élevées entre le milieu et la fin de l'été. À ce chapitre, on an entrepris d'élaborer un modèle de la demande en oxygène et de la production de méthane des sédiments. Cependant, les émissions cumulatives nettes de méthane pour l'entièreté du réseau fluvial de la Winnipeg (*voir la figure 5.6*) sont beaucoup moins élevées que celles observées aux sites inondés de la RLE.

D'autres techniques de mesure, élaborées par des chercheurs de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et utilisées à divers réservoirs hydroélectriques du Québec, ont fourni pour cette région des estimations additionnelles des émissions qui sont semblables à celles obtenues dans les études réalisées dans la RLE. Les résultats des chercheurs de l'UQAM laissent penser que, dans cette région, les émissions de méthane des réservoirs hydroélectriques existants étaient également faibles, et celles d'oxyde de diazote très faibles. Cependant, les émissions de CO_2 de certains des réservoirs récemment formés étaient élevées par rapport aux émissions de fond pré-inondation, et pourraient demeurer importantes pour des décennies (Duchemin, 2002).

5.2.3 Modélisation des flux de GES

Des modèles permettant de simuler la production et le flux de CO_2 et de méthane pour les réservoirs ont été élaborés :

- Élaboration initiale d'un modèle empirique simple pour les réservoirs de la RLE. Cependant, comme ce modèle n'était pas piloté par des processus, il devait être réétalonné à l'aide de nouvelles données provenant de chacun des réservoirs auxquels il était appliqué.

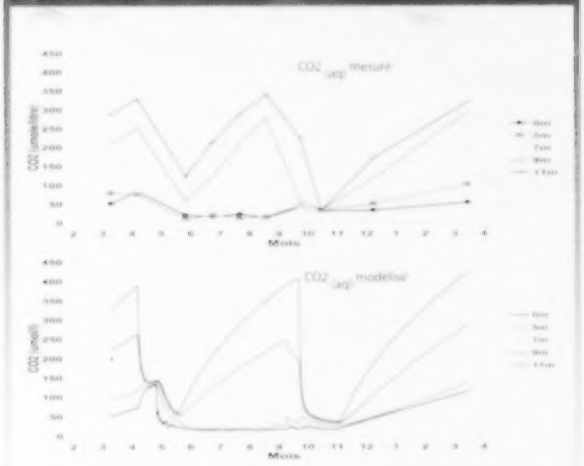
- Par la suite, un modèle plus avancé a été élaboré pour utilisation avec les données issues du système de surveillance continue du CO_2 installé à l'un des lacs de la RLE. Ce modèle comprend les bilans du carbone-13 et du carbone-12. Avec ces deux bilans, on obtient un bien meilleur niveau de confiance quant à la précision des paramètres du modèle. Ce modèle a aussi été utilisé pour calculer et interpréter les flux de GES pour le projet FLUDEX.

- Les chercheurs ont aussi élaboré une version similaire d'un modèle de production de CO_2 pour simuler la production nette de CO_2 des réservoirs de la Winnipeg. Avec étalonnage à partir des données hebdomadaires, les simulations ont montré qu'une quantité importante du CO_2 produit par le système de la Winnipeg se trouve transportée dans le lac Winnipeg. Le modèle élaboré pour ce phénomène comprend aussi un sous-modèle pour le ^{13}C. Cette partie du modèle sera étalonnée quand toutes les données sur le ^{13}C seront disponibles. Certains résultats des simulations produites par le modèle sont présentés à la *figure 5.7*.

- Les résultats de la modélisation montrent une forte relation positive entre les flux de CO_2 et les concentrations de carbone organique dissous. On a observé que la production primaire constituait un facteur secondaire important pour ce qui est des flux durant le milieu de l'été, quoique peut-être moins important sur l'année entière.

- Des études sur l'échange gazeux utilisant comme traceur le gaz SF_6 ont aussi été menées en collaboration avec des chercheurs de l'Université de l'Alberta pour comprendre la relation entre le coefficient de transfert de masse pour l'échange gazeux et les vents faibles. Cette relation est importante pour le calcul des flux au moyen de la méthode de la couche limite mince. Les résultats ont montré que, lorsque la vitesse du vent est basse, l'échange gazeux est plus important que ne le prédit la relation communément utilisée dans les systèmes plus grands.

FIGURE 5.7



Comparaison des concentrations de CO_2 mesurées dans un lac naturel de la RLE avec celles simulées au moyen d'un modèle empirique simple. Hesslein, 2003.

5.2.4 Communication des résultats aux intervenants et aux décideurs

Les scientifiques de l'Institut des eaux douces participant aux recherches sur les flux de GES issus des réservoirs hydroélectriques ont utilisé diverses voies pour communiquer les résultats aux intervenants, particulièrement aux décideurs :

- Réunions régulières avec les autorités responsables de la production d'énergie dans plusieurs provinces pour présenter les résultats et discuter de collaborations futures en matière de recherche et de surveillance avec les personnels des services publics.

- Discussions fréquentes avec le personnel d'Environnement Canada travaillant à l'élaboration des inventaires nationaux de gaz à effet de serre pour aider à établir des méthodes incluant les émissions des réservoirs hydroélectriques.

- Présentations à des ateliers du PRDE et du projet FLUDEX et sur d'autres forums scientifiques.

- Présentation annuelle de rapports d'activité au comité directeur du PON 6.2.1 pour inclusion dans les rapports annuels du PRDE.

- Articles de recherche publiés dans des actes de congrès et diverses publications avec comité de lecture. Nombre d'entre eux figurent dans la section « Références » ci-dessous.

5.3 Les objectifs du PRDE ontils été atteints?

De façon générale, les travaux réalisés dans le cadre de ce volet du plan de travail du PON 6.2.1 du PRDE ont atteint ou dépassé les objectifs de recherche. Les résultats se résument comme suit :

1. *Meilleure compréhension des processus influant sur les flux de gaz à effet de serre associés aux réservoirs hydroélectriques*

- Les émissions de CO_2 augmentent significativement après inondation, et sont en général liées à la concentration de COD dans les eaux des réservoirs.
- Ces émissions continuent durant une dizaine d'années après la première mise en eau, mais reviennent à peu près aux niveaux observés dans les lacs naturels après plusieurs décennies.
- Les émissions de méthane des vieux réservoirs sont faibles. Toutefois, celles des écosystèmes nordiques nouvellement inondés peuvent être importantes. Ces émissions augmentent avec l'élévation de la température, et les plus importantes sont celles des îles flottantes de tourbe qui montent à la surface du réservoir après inondation. La majeure partie de ces émissions est associée à la formation de bulles.
- Les émissions de méthane augmentent durant les premières années de l'inondation, et peuvent demeurer importantes plusieurs décennies après l'inondation.
- Cependant, en général, les émissions de méthane des écosystèmes boréaux sont portées à demeurer, à quantité égale de TWh produits, plus faibles d'un ordre de grandeur que celles issus des centrales électriques à combustibles fossiles.
- Dans les années suivant immédiatement l'inondation, ni les émissions de CO_2 ni celles de méthane ne semblent tributaires de la quantité de matière organique inondée.
- Après inondation, il peut y avoir réduction des émissions d'oxyde de diazote, le réservoir pouvant même devenir un puits net pour ce gaz.

Ces résultats donnent déjà une bonne idée des types de terres inondées qui sont susceptibles de produire de fortes émissions, et de ceux qui ne le sont pas.

2. *Élaboration de méthodes permettant de quantifier avec précision les changements des flux nets après réalisation d'aménagements hydroélectriques*

- De l'instrumentation et des protocoles pour l'échantillonnage régulier des concentrations de gaz à effet de serre dans les réservoirs hydroélectriques ont été élaborés et améliorés, et fournissent maintenant des données de qualité pour le calcul courant des émissions. Un réseau de stations de surveillance est déjà en place au Manitoba.
- De l'instrumentation pour la surveillance continue des émissions de GES issues des réservoirs a été mise à l'essai et améliorée, et est aujourd'hui déployée dans divers sites du réseau de Manitoba Hydro.
- De l'instrumentation permettant une meilleure mesure des bulles de méthane que dégagent les îles flottantes de tourbe est actuellement mise à l'essai.

3. *Communication aux décideurs de l'information recueillie, à titre de base scientifique pour l'élaboration de diverses options en ce qui concerne les programmes d'atténuation des émissions de GES*

Les chercheurs participant au programme ont communiqué les résultats aux principaux intervenants, et ont mieux fait comprendre la nécessité de prendre en compte les émissions de gaz à effet de serre issues des réservoirs hydroélectriques dans l'élaboration des inventaires de GES et des politiques énergétiques nationales.

En particulier, le groupe de la RLE a collaboré étroitement avec Manitoba Hydro, qui a déjà commencé à prendre en compte les implications des résultats obtenus dans ses politiques d'aménagement et de gestion.

Références

Bodaly,R.A., Beaty, K.G. , Henzel, L.H. *et al.*, 2004. Experimenting with hydroelectric reservoirs. *Environ. Sci. Technol.* 38: 346A-352.

Delmas, R. 2005. Long term greenhouse gas emissions from the hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) and potential impacts. *Global Warming and Hydroelectric Reserrvoirs, CDD* 363.73874, pp. 117-124.

dos Santos, M.A. (dir.). 2005. Carbon budget in tropical reservoirs. *Global Warming and Hydroelectric Reserrvoirs, CDD* 363.73874, pp 95-100.

Duchemin,E., *et al.*, 2002. Hydroelectric reservoirs as an anthropogenic source of greenhouse gases. *World Resources Review* 14:334-352.

Fearnside, P.M. 2002. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucurui dam) and the energy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133: 69-96.

Fearnside, P.M. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly clean energy source: Editorial Comment. *Climatic Change*, 66, pp. 1-2.

Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Kouadio, G. *et al.*, 1999. Long-term greenhouse gas emissions from hydro electric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biological Change* 13:503-517.

Gagnon, L., et Chamberland, A., 1993. Emissions from hydroelectric reservoirs and comparison of electricity, natural gas and oil. *Ambio* 22:268-269.

Hesslein, R.H. 2003. GHG fluxes from hydroelectric reservoirs. Présenté à l'atelier du PON 6.2.1 du PRDE, 20-22 janvier 2003, Toronto.

Hesslein, R.H., Hoboka, M. , Joyce, E. *et al.*, 2007. Hydro reservoir GHG emissions. Présenté à l'atelier final du PON 6.2.1 du PRDE, 21-23 février 2007, Ottawa.

Huttunen, J., *et al.*, 2002. Fluxes of CH_4, CO_2 and N_2O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland. *Global Biogeochem Cycles* 2002, *16*, 1–17.

Huttunen, J. 2005. Long-term net methane release from Finnish hydro reservoirs. *Global Warming and Hydroelectric Reserrvoirs*, CDD 363.73874, pp. 125-127.

Lima, I.B., Fernando, M., Ramos, F.M., Bambace, L.A. et Rosa, R.R., 2007. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: A developing nation perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12: 1573-1596.

Matthews, C.J.D., Joyce, E.M., St. Louis, V.L. *et al.*, 2005. Carbon dioxide and methane production in small reservoirs flooding upland boreal forest. *Ecosystems* 8:267-285.

Rudd, J., Harris, R. , Kelly, C. et Hecky, R.E., 1993. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? *Ambio* 22: 246-248.

Saquet, M.A.M. 2003. Greenhouse gas flux and budget from an experimentally flooded wetland using stable isotopes and geochemistry. Mémoire de maîtrise, Université de Waterloo.

Scott, K.J., Kelley, C.A. et Rudd, J.W.M., 1999. The importance of floating peat to methane fluxes from flooded peatlands. *Biogeochemistry* 47: 187-202.

Sims, R.E., Schock, R.N. *et al.*, 2007. Chapitre 4. Energy supply. *In* Mitigation of Climate Change. Rapport du Groupe de travail III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève.

St. Louis, V.L., Partridge,A.D., Kelly, C.A. et Rudd, J.W.M., 2003. Mineralization rates of peat from eroding peat islands in reservoirs. *Biogeochemistry* 64:97-100.

Svensson, B.S., et Ericson, S.-O. 1993. Does electric power increase global warming? *Ambio* 22:269-270.

Tremblay, A. (dir.). 2005 : Greenhouse gas emissions - fluxes and processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Springer, Berlin.

UNESCO, 2006 : Workshop on GHG from freshwater reservoirs, 5-6 décembre, administration centrale de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, Paris, France, UNESCO PHI-VI. Site Web du PHI : http://www.unesco.org/water/ihp/index_fr.shtml.

CHAPITRE 6

Priorités des recherches à venir sur les puits de gaz à effet de serre au Canada

Auteur coordonnateur et principal : **H. Hengeveld**

Contributeurs
R. L. Desjardins,
P. Hall,
H. H. Jansen,
R. Hesslein,
F. Whitney

6.1 Introduction

L'information présentée dans les précédents chapitres montre bien que d'importants progrès ont été réalisés pour fournir aux décideurs politiques et aux gestionnaires de programmes les solides conseils scientifiques nécessaires pour inventorier les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique, minimiser ces émissions et maximiser les puits de carbone. Au rang de ces progrès figurent les suivants : des techniques améliorées permettant de mesurer et de quantifier les sources, les puits et les réservoirs de GES associés aux écosystèmes terrestres et marins situés au Canada et à proximité; une meilleure compréhension du fonctionnement de ces processus; l'élaboration de modèles biogéochimiques qui pourraient simuler avec plus d'exactitude le comportement passé, actuel et futur des flux de GES et sortant des écosystèmes et y entrant.

Ces résultats illustrent également qu'un investissement relativement modeste dans les ressources, comme celles fournies par le Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE) grâce à son programme au niveau de l'objectif (PNO) 6.2.1, si elles sont bien ciblées, coordonnées et répétées à un niveau durable pendant plusieurs années, peut permettre la participation de scientifiques clés dans des programmes coopératifs beaucoup plus vastes aux niveaux national et international. Ces collaborations permettent de tirer profit efficacement des importantes ressources des autres partenaires (ministères fédéraux, universités, industrie privée et/ou organismes étrangers), afin d'aider à atteindre les résultats attendus déterminés par le PRDE dans le cadre du PNO 6.2.1.

Toutefois, tel qu'il est énoncé dans les résultats attendus dans le cadre du PRDE pour les objectifs en 2007, les progrès de la compréhension des cycles mondiaux du carbone et de l'azote réalisés jusqu'ici n'apportent qu'une réponse partielle aux nombreuses questions stratégiques liées à l'interférence de l'humain sur ces cycles. Il reste encore beaucoup à faire. En effet, les cycles du carbone et de l'azote sont très complexes. Ils sont en outre sensibles aux importantes, quoique mal comprises, rétroactions chimiques, physiques et biologiques qui interviennent au sein du système dynamique de la Terre, notamment les changements climatiques. Il est donc possible que les rétroactions et les processus qui régissent ces cycles aujourd'hui soient différents demain.

Au moment où se termine l'investissement du PRDE dans la recherche liées aux puits de GES au Canada, une autre importante question administrative surgit. De quelle façon les recherches à venir sur les sources et les puits de gaz à effet de serre au Canada seront-elles coordonnées et comment les priorités seront-elles établies? Qui sera responsable de coordonner et prioriser les recherches connexes, et d'où viendront les ressources d'appui requises pour aider à cibler la recherche afin de traiter efficacement les priorités établies?

Ces questions ont déjà été soulevées. Elles ont fait l'objet de discussions dans bon nombre d'ateliers ciblés au cours des dernières années. La plus récente de ces rencontres a eu lieu à Ottawa en février 2007 (PRDE, 2007). Les sections suivantes traitent de bon nombre des opinions exprimées par les principaux experts et par les gestionnaires de programme au cours de discussions et sur d'autres tribunes.

6.2 Priorités de recherche par secteur

Le programme de recherche établi pour répondre aux questions stratégiques liées aux sources et puits de GES, ainsi qu'aux questions de changements climatiques en général, doit être adaptable et flexible. En effet, même si la compréhension s'améliore, le contexte décisionnel en matière de politiques connait aussi des changements. C'est pourquoi de nouvelles questions se font jour.

Étant donné qu'on souhaite maintenir un programme répondant à des besoins changeants, il serait risqué de vouloir définir des axes de recherches futurs spécifiques. Néanmoins, certains objectifs généraux exigeant un complément d'attention semblent déjà évidents. On les trouvera, par secteur, dans les sections ci-dessous.

6.2.1 Agriculture

Les conclusions des recherches menées à ce jour sur les sources et puits de GES dans le paysage agricole canadien ont permis de réaliser d'importants progrès vers l'atteinte des résultats recherchés dans le cadre de l'objectif 6.2.1 du PRDE. Il s'agit notamment d'un système d'inventaire fiable et complet des GES, de modèles améliorés et d'une sensibilisation accrue aux pratiques qui réduiront efficacement les émissions de GES des exploitations agricoles.

Toutefois, parmi les objectifs généraux permettant d'améliorer la compréhension des phénomènes figurent les éléments suivants :

i) Regarder plus en profondeur – pour mieux comprendre les processus fondamentaux : Les modèles de prédiction et les inventaires de GES reposent sur une compréhension solide et complète des processus sous-jacents. Les recherches fondamentales qui assurent cette compréhension ne donnent pas toujours de résultats dans l'immédiat, mais peuvent offrir des solutions, encore inconnues, à des problèmes complexes qui se poseront dans des dizaines d'années (Whitesides et Crabtree, 2007). Parmi les questions de recherche fondamentale qui peuvent mériter une attention particulière, on peut citer les suivantes :

   - Quantification et compréhension des processus de la rhizosphère. Le carbone des plantes est le matériau brut de tout nouveau C organique du sol, et une grande partie de ce C entre dans le sol par les racines et les matériaux associés aux racines. Mais nous ne comprenons pas encore très bien ces processus, ni ne pouvons estimer avec exactitude la quantité de C qu'ils ajoutent au sol.

   - Mécanismes de production, de consommation et de rejet de N_2O dans l'atmosphère : les émissions de N_2O varient grandement, dans le temps comme dans l'espace. Les origines précises dans le profil du sol ainsi que les processus de formation et de rejet restent obscurs. De récentes indications suggèrent même que la consommation de N_2O par les sols peut aussi être un facteur de complication (Chapuis-Lardy *et al.*, 2007) qui n'a pas été adéquatement pris en compte. L'intégration de mesures des émissions de N_2O dans le temps et l'espace doit être étudiée plus attentivement.

ii) Voir plus loin – envisager les changements à venir : Les agroécosystèmes, peut-être plus que toute autre utilisation des terres, sont l'objet de changements intenses et rapides. Dans les prochaines décennies, les changements ne seront peut-être pas uniquement attribuables au climat et au CO_2 atmosphérique (qui

peuvent tous deux avoir une incidence importante), mais pourront également découler de profondes modifications des quantités et des types de produits attendus des terres agricoles, et de la façon de les produire. Parmi les changements qui retiennent déjà notre attention figurent les suivants :

- *Influence de l'évolution du climat, du CO_2 atmosphérique et des pratiques de gestion du C stocké dans le sol* : ces dernières années, une bonne partie des recherches visaient à améliorer le C du sol (séquestration du C), mais nous devrons peut-être à l'avenir nous attacher à préserver le C à mesure que son accumulation y atteindra un plateau et que de nouveaux facteurs (p. ex., températures plus élevées, changements de l'utilisation des terres) menaceront d'accélérer la décomposition du carbone du sol.

- *Influence de l'accroissement de la production de biocarburants* : les terres agricoles sont de plus en plus considérées comme des sources de matières premières pour la production d'éthanol, de biodiesel et d'autres biocarburants. Ce virage soulève de nombreuses questions, notamment : quel est l'avantage net de telles pratiques pour la réduction des émissions de GES? Quel est le coût écologique d'un accroissement de l'exportation de C pour les agroécosystèmes? De quelle façon les changements qui devront être apportés à la production agricole pour fournir la biomasse modifient-ils les cycles du carbone et des nutriants dans ces paysages?

- *Changements dans les suppléments d'azote* : la production agricole est devenue de plus en plus dépendante de l'azote fixé industriellement. Ces sources d'engrais, toutefois, auront tendance à devenir de plus en plus coûteuses en raison de la forte consommation d'énergie associée à leur production. De plus, des utilisations non efficaces de ces engrais ont, par le passé, causé des interférences avec l'environnement. Ces éléments et d'autres facteurs peuvent entraîner des changements dans la gestion de la fertilisation à l'azote sur les fermes, avec des incidences potentiellement plus profondes sur les émissions de GES et d'autres indicateurs environnementaux.

Considérant ces changements à venir, et d'autres, il serait utile d'envisager comment se présenteront et se comporteront les agroécosystèmes dans 30 ou 50 ans et d'entamer des recherches visant à résoudre les questions que ces nouvelles conditions pourraient créer. De plus, il serait prudent d'entreprendre des expériences dès maintenant, en vue d'une évaluation à long terme de l'incidence des changements sur les agroécosystèmes.

iii) Avoir une vision élargie - une approche écosystémique : des programmes comme le PRDE nous ont rappelé les liens qui existent entre les biomes; les GES, parce qu'ils sont rejetés dans l'atmosphère planétaire, nous imposent de dépasser les frontières artificielles des disciplines scientifiques, de la géographie et de l'utilisation des terres. Bien que des progrès aient été réalisés, il est urgent d'en accomplir d'autres. En particulier, nous pourrions étudier spécifiquement les interfaces entre les biomes, en insistant notamment sur la science des lisières, entre les fermes et les forêts, entre les fermes et les zones humides et, peut-être encore plus particulièrement, entre les fermes et les zones urbaines. À mesure que l'urbanisation se poursuit et que les frontières entre les zones urbaines et les autres utilisations des terres deviennent floues, cette interaction entre les espaces de vie et les espaces de travail peut devenir un champ d'étude particulièrement essentiel.

iv) Voir au-delà des puits de carbone et des gaz à effet de serre – les autres services de l'écosystème : les terres agricoles remplissent de nombreuses fonctions, et l'atténuation des changements climatiques n'en est qu'une, qui ne reçoit en fait pas toujours la plus haute priorité. C'est pourquoi la gestion des terres dans une optique de réduction des émissions exige que soient pris en compte ces autres services de l'écosystème : production d'aliments, habitat, filtration de l'eau, aspect esthétique et récréatif, et de nombreux autres. L'étude de ces services de l'écosystème, parallèlement à l'atténuation des changements climatiques (et à l'adaptation), nécessitera une synergie plus étroite avec les autres disciplines scientifiques, l'apprentissage et les arts (voir la figure 2.4).

6.2.2 Forêts

La capacité du Canada de présenter des rapports sur les stocks de carbone, de réclamer des crédits de puits et d'estimer les émissions dépendra de la fiabilité des estimations générées par les modèles. Les modèles appliqués à diverses échelles spatiales sont les outils d'intégration qui permettent d'obtenir des estimations, à l'échelle nationale, des puits et des sources de GES, et ce à partir de plusieurs différents types de données expérimentales et d'observation. Il est nécessaire d'obtenir de meilleures données et d'améliorer constamment les modèles afin de veiller à ce que les négociateurs aient à leur disposition les meilleurs outils de travail. Les répercussions de l'activité humaine sont importantes parce que c'est nous qui régissons notre économie. Les prévisions des perturbations varient grandement en fonction des scénarios du GIEC adoptés (par exemple, famille de scénarios A2 comparativement aux scénarios B2), ce qui s'avère d'une importance cruciale puisque les perturbations dues aux feux et aux pullulations d'insectes jouent un rôle majeur dans l'état de puits ou de source de carbone des forêts. Les changements climatiques modifient déjà les écosystèmes forestiers. De plus, les insectes nuisibles causeront encore plus de dommages, on observera la transformation d'insectes auparavant considérés inoffensifs en espèces nuisibles et les risques d'invasion par des ravageurs exotiques seront accrus. Toutes ces conditions perturbent les forêts, déjà transformées quant aux essences présentes, à la vitalité de leurs classes d'âge et à leur milieu, ce dernier ayant déjà subi des perturbations par suite de changements climatiques. De plus, lorsqu'il y a interaction entre les ravageurs et les incendies, on observe un risque accru de feux de friche, surtout s'il s'agit de forêts qui ont déjà subi des dommages par les insectes. Bon nombre des paramètres pour décrire ces situations n'ont pas encore été définis et, par conséquent, d'importantes incertitudes demeurent en ce qui concerne les répercussions possibles.

Les mesures de gestion forestière modifient la dynamique du carbone; or il est important de comprendre les effets possibles du boisement et du reboisement sur la capacité d'absorption du carbone des puits forestiers. Il faut connaître les répercussions de toute une gamme de ces mesures de gestion, y compris les effets des mesures de protection contre les feux de friche et les pullulations d'insectes, des coupes de récupération, de la préparation des sites, de la fertilisation des forêts et des méthodes d'exploitation forestière. Les aménagistes forestiers veulent pouvoir mesurer avec précision le rôle du boisement et du reboisement dans la dynamique des puits de carbone. Comprendre et quantifier les répercussions des mesures de gestion forestière permettra aussi d'établir les différences entre les effets dus directement à l'activité humaine et les effets naturels ou indirectement causés par l'activité humaine. Des incertitudes demeurent en ce qui concerne la dynamique du carbone et des GES dans les sols organiques profonds et dans les tourbières boisées et aussi en ce qui concerne l'interaction entre les milieux humides et les forêts qui constituent des écosystèmes mixtes complexes. Il faut aussi poursuivre les travaux de manière à mieux comprendre l'effet des perturbations naturelles sur la dynamique du carbone forestier, en particulier dans le cas des perturbations dues aux insectes défoliateurs qui n'entraînent pas le remplacement des peuplements, mais induisent une réduction de la croissance à des échelles régionales.

Malgré les progrès considérables en vue d'atteindre les objectifs du programme, les besoins actuels et à venir resteront nombreux et variés si les incertitudes ne doivent être considérées qu'à la lumière des besoins politiques changeants. D'importantes incertitudes persistent aussi quant aux estimations des répercussions des changements à l'échelle mondiale sur les processus continus que sont la croissance des arbres, la décomposition et le bilan net de carbone à l'échelle du peuplement qui en résulte. De nombreuses questions scientifiques encore sans réponses contribuent à ces incertitudes. La modélisation des réactions des forêts aux changements climatiques est un domaine de recherche active qui requiert un financement soutenu et ce, afin d'améliorer les estimations du bilan du carbone et contribuer à l'élaboration de stratégies d'atténuation et d'adaptation.

Les progrès réalisés à ce jour dans l'élaboration d'outils efficaces pour simuler la réaction des forêts canadiennes aux changements environnementaux et aux activités de gestion de la forêt sont encourageants. Comme on l'a indiqué au chapitre 3, ces modèles fournissent déjà des conseils efficaces aux décideurs politiques.

Toutefois, comme pour la simulation des flux de carbone dans les sols agricoles canadiens, il reste d'importantes lacunes dans notre capacité de prédire avec exactitude le comportement futur de la forêt, particulièrement en réaction aux changements du climat et de la composition

de l'atmosphère. Ces lacunes continuent de limiter la confiance qui peut être accordée aux conseils offerts aux décideurs politiques quant aux puits de GES. Le modèle utilisé pour permettre au Canada d'inclure les flux de carbone forestiers dans les déclarations à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, par exemple, n'inclut pas pour le moment les effets de la sécheresse. De plus, les limites de ces modèles affectent également la performance des modèles du système Terre dans les simulations des rétroactions complexes qui prennent place entre le climat et les écosystèmes et donc leur capacité à projeter avec exactitude les changements à venir du climat et de la composition de l'atmosphère. Il faut donc poursuivre les recherches.

On trouvera ci-après quelques-unes des priorités de recherches connexes :

i) **Étendre la portée et les détails des mesures** : Some components of the forest landscape are inadequately addressed or absent from the current modelling activities. These include:

- Tourbières forestières. Il y a déjà eu des recherches sur les tourbières forestières. Ces tourbières restent une importante composante des écosystèmes boréals ainsi que les flux de gaz à effet de serre qu'elles produisent. Bien que le réservoir de carbone dans ces tourbières soit vaste, il est difficile d'en évaluer l'ampleur ou de connaître le rôle des incendies et d'autres perturbations sur les flux de carbone de la tourbière. De plus, il est nécessaire de mieux comprendre la façon dont les changements des niveaux d'eau dans les tourbières modifient les flux.

- Décomposition de la litière et du carbone souterrain, en particulier les racines; pour passer à une échelle supérieure à celle d'études propres à des sites, il faudra mieux connaître les taux de décomposition souterraine, et comment ces taux varient d'un site à l'autre et dépendent du type de litière, et pourquoi.

ii) **Inclure d'autres composantes et rétroactions dans les modèles d'écosystème forestier** : Il existe actuellement divers modèles pour étudier les processus des flux de carbone, simuler le comportement de l'écosystème forestier et évaluer avec exactitude les flux nets des gaz à effet de serre à des fins d'inventaire. Toutefois, la majorité ne rendent pas adéquatement l'influence des changements environnementaux et ne comprennent pas toutes les composantes. Par exemple :

- Les modèles d'incendie doivent ajouter une composante de tourbière et ajouter des types de combustibles de carbone noir.

- Les grands modèles du bilan de carbone du secteur forestier canadien, comme le CBM-CFS3 et le modèle du réseau Fluxnet-Canada, doivent inclure des projections des changements climatiques à venir, des courbes de croissance corrigées dérivées des modèles des processus et améliorer les « facteurs de correction » (dérivés des modèles des processus) de la courbe de croissance et des sous-modèles de défoliation par les insectes sensibles au climat afin de mieux simuler les flux et réservoirs de carbone passés, actuels et futurs.

iii) **Mieux comprendre les rétroactions complexes et les variables en jeu dans les écosystèmes**

- La variabilité du climat, en particulier les fluctuations des sécheresses et des saisons humides, contribue pour beaucoup à la variabilité interannuelle des flux de gaz à effet de serre entre les paysages forestiers et l'atmosphère. La compréhension des processus en cause, tant au-dessus du sol que souterrains, est donc importante pour produire des rapports annuels sur les flux nets et projeter la réaction future de ces flux aux changements climatiques. Il faut effectuer des mesures à long terme (plus de 20 ans) sur divers sites pour mieux les comprendre. La réaction de la respiration autotrophe et celle de la respiration hétérotrophe devront être surveillées et caractérisées. De plus, les résultats propres au site devront être intégrés aux données provenant des tours de flux et de la télédétection pour évaluer la cohérence spatiale des réactions et transformer les résultats connus recueillis au niveau du peuplement en estimations à l'échelle du paysage.

- Il faudra effectuer des études supplémentaires sur le couplage des cycles du carbone et de l'eau dans les écosystèmes forestiers.

- La majorité des modèles ne traitent pas efficacement les processus de succession forestière dans les simulations. La compréhension de ces processus et leur inclusion dans les modèles de simulation est importante tant pour projeter la réaction future des flux de carbone forestier à un changement environnemental que pour évaluer l'incidence des pratiques de gestion de la forêt sur le rôle des forêts canadiennes comme sources ou puits nets de gaz à effet de serre.

6.2.3 Océans

À bien des égards, les résultats des recherches montrent que la fertilisation au fer à grande échelle, comme moyen d'accroître les puits de carbone présents dans l'océan, ne semble pas réaliste. Toutefois, comme on l'a indiqué au chapitre 4, diverses questions émergentes connexes, importantes pour les décideurs politiques, sont devenues des préoccupations de premier ordre. Entre autres :

i) **L'acidification de l'océan.** La hausse des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère contribue à une augmentation lente mais constante de l'acidité de l'océan. Quelles en seront les incidences sur les carbonates stockés dans l'océan? Comment cela affectera-t-il la capacité de l'océan à agir comme puits de CO_2? Quelles sont les espèces de planctontes à risque? Quelles en sont les conséquences pour les écosystèmes marins, en particulier les organismes à coquille?

ii) **Les effets du réchauffement planétaire sur les flux de carbone.** Comme pour les écosystèmes terrestres, les changements climatiques peuvent grandement perturber les processus biogéochimiques qui régissent les flux du carbone océanique. Toutefois, l'océan étant un fluide dynamique, les changements climatiques perturberont également la circulation océanique et donc le transport physique du carbone. Il faut donc, parallèlement, mieux comprendre le devenir du carbone stocké dans la zone crépusculaire (100 à 1 000 m), la dynamique du carbone organique dissout et de la matière organique dissoute dans les océans et les non-linéarités complexes des processus du cycle du carbone. La possible réduction de la formation d'eau profonde dans la région de la mer du Labrador, causée par l'apport d'eau douce de l'Arctique et le réchauffement de l'eau de surface, peut y faire baisser la densité de l'eau de surface et donc l'absorption de CO_2. Il existe aussi des écarts entre les modèles de simulation et les observations, qui devraient être compris et réglés. La dynamique des bactéries dans ces modèles semble instable et devrait être améliorée. Il est donc plus important que jamais de poursuivre les observations en même temps que d'élaborer des modèles des principaux régimes océaniques des hautes latitudes.

iii) **Hydrates de gaz subocéaniques** – dans certaines régions des océans nordiques adjacents au Canada, il existe sous le plancher océanique de vastes dépôts d'hydrates de gaz gelés. Cet état de choses donne à craindre que les eaux de surface plus chaudes, si elles sont transportées vers le fond de l'océan, ne provoquent un rejet massif du méthane contenu dans ces hydrates.

6.2.4 Émissions provenant des réservoirs hydroélectriques

Les résultats de recherche obtenus jusqu'ici sur les émissions de gaz à effet de serre provenant des réservoirs hydroélectriques ont permis de mieux connaître la relation entre le type de terrain inondé et ces émissions. Toutefois, de nombreuses questions restent sans réponse, et certains défis importants restent à relever, avant que les émissions de gaz à effet de serre des grands réservoirs hydroélectriques actuels puissent être calculées avec une confiance élevée et que les émissions d'éventuels nouveaux projets puissent être prédites avec confiance. Par exemple :

i) **L'instrumentation et les protocoles de surveillance doivent être améliorés.** En particulier, il faut développer davantage et tester les méthodes permettant de saisir les émissions de méthane rejeté en grosses bulles des fonds de réservoirs doivent être davantage élaborées et testées. Si l'on ne connaît pas mieux l'ampleur des émissions causées par ces bulles, il sera impossible de savoir si les mesures et calculs actuels ont surestimé significativement les émissions de méthane des réservoirs hydroélectriques du Nord. Il

faudra également améliorer le réseautage entre les divers groupes engagés dans de telles études afin de comparer et de valider les différentes techniques de mesure.

ii) **Les estimations d'émissions doivent être portées à une échelle plus grande.** Malgré l'importante hétérogénéité spatiale des émissions des réservoirs, la majorité des mesures sont présentement faites sur de petits réservoirs ou à une échelle inférieure au réservoir. Des méthodes doivent être élaborées pour mettre de telles mesures à une échelle plus grande afin d'obtenir des estimations agrégées des émissions pour des systèmes complets de réservoirs hydroélectriques. De plus, les techniques doivent être transportables afin d'être appliquées aux réservoirs de tout le Canada, dont chacun a ses caractéristiques propres. Il faudra pour cela mener des recherches sur nombre de facteurs importants autres que les flux locaux de gaz à effet de serre pour comprendre la source nette d'émissions de gaz à effet de serre provenant de réservoirs hydroélectriques et l'attribuer à des causes naturelles ou anthropiques. Par exemple, pour bon nombre de réservoirs, les émissions antérieures à l'inondation ou à la régularisation du niveau d'eau ne sont pas bien comprises, non plus que la part éventuelle qu'un élément humain d'utilisation des terres pouvait y jouer.

iii) **Des modèles basés sur les processus doivent être élaborés.** À terme, l'objectif est d'élaborer des modèles basés sur le processus qui puissent être appliqués à différents bassins hydrologiques pour simuler les émissions passées, actuelles et futures, évaluer les incidences des nouveaux projets et conseiller les gestionnaires d'installation sur les façons de minimiser les émissions. Les modèles simples et empiriques disponibles actuellement sont propres au bassin et n'ont pas de capacité prédictive. Il faudra donc consacrer beaucoup d'efforts à comprendre la genèse des gaz à effet de serre et des processus d'émission, puis à élaborer des modèles dynamiques fondés sur ces processus. Ces modèles doivent aussi permettre de projeter le rôle relatif des émissions de CO_2 et de méthane. Bien que de bonnes mesures et des recherches sur les processus soient essentielles à l'élaboration de ces modèles, le développement des modèles devrait être une priorité.

iv) **Les sources en amont et les émissions en aval doivent être incluses dans les estimations.** Il faudra accorder davantage d'attention à l'origine du COD entrant dans les réservoirs et donc aux contributions aux émissions du réservoir qui ne seraient pas attribuables aux processus d'inondation. De même, certaines des émissions de gaz à effet de serre générées dans un réservoir inondé peuvent être évacuées lors du dégazage de la turbine des génératrices hydroélectriques ou quitter le réservoir par les conduites d'évacuation et être relâchées en aval. Elles peuvent aussi être modulées par le moment de survenue et le volume du rejet d'eau des réservoirs pour des raisons de gestion du système hydroélectrique. Les méthodes permettant d'inclure ces émissions nécessiteront la participation d'experts des milieux aquatique et océanique.

6.3 Coordination et financement

Depuis de nombreuses décennies, les études du cycle du carbone et de l'azote font partie inhérente des recherches au sein des ministères du gouvernement du Canada axés sur les ressources. Ces cycles sont en effet des facteurs importants d'une agriculture productive, de la gestion des forêts et des chaînes alimentaires de l'océan.

Des recherches plus ciblées sur le rôle des flux de carbone et d'azote dans les écosystèmes naturels situés au Canada et à proximité, en tant que sources et puits de gaz à effet de serre atmosphériques, ont débuté grâce aux fonds offerts dans le cadre du PRDE pour des études menées par le MPO, AAC et le SCF au milieu des années 1980. Bien que le niveau de financement du PRDE ait lentement augmenté au cours des 15 années suivantes, les projets entrepris étaient majoritairement fondés sur les propositions soumises par les scientifiques et visant une amélioration générale de la surveillance et de la compréhension du cycle du carbone dans les écosystèmes canadiens et les océans adjacents.

Cette approche de financement des recherches sur les sources et puits des gaz à effet de serre a changé significativement en 2000 lorsque le PRDE a instauré sa structure de gestion de programme fondée sur les résultats. Dans le cadre de cette restructuration, l'objectif

6.2.1 a été établi en vue d'améliorer la compréhension de l'ordre de grandeur et des processus qui influent sur les sources et puits de gaz à effet de serre dans les écosystèmes canadiens et les océans adjacents, et l'élaboration de conseils pour les décideurs politiques sur les puits qui pourraient être renforcés par des activités humaines directes. Le chapitre 1 aborde plus en détail le programme qui s'en est suivi.

Ce financement ciblé, en plus d'améliorer directement les activités de recherche nécessaires pour atteindre les objectifs établis, offrait deux autres grands avantages. En premier lieu, il a aidé à coordonner les recherches entre diverses disciplines, entre les ministères et entre les laboratoires gouvernementaux et les universités en une activité ciblée visant directement à fournir des avis aux décideurs politiques. En second lieu, il a permis à d'importantes ressources financières et humaines déjà consacrées à des aspects plus généraux du cycle planétaire du carbone de se concentrer sur les questions spécifiques posées pour atteindre les objectifs définis par le PRDE. Ces dernières ont en effet tiré profit des ressources d'autres programmes qui dépassaient largement l'investissement financier direct du PRDE.

Les gestionnaires de recherches du gouvernement du Canada ont cité le succès de l'objectif 6.2.1 du PRDE en matière de coordination et de ciblage des activités de recherche comme exemple de la manière dont les connaissances scientifiques du gouvernement peuvent être améliorées sans engagements importants de ressources supplémentaires (Grace et Butts, 2007). Ils remarquent qu'en dépassant le mandat individuel et les réseaux traditionnels des divers partenaires engagés dans l'activité de recherche, le programme a connu un grand succès dans l'établissement de nouveaux partenariats et d'objectifs partagés qui ciblaient une priorité nationale commune. Il aide également à cibler les activités scientifiques sur les changements prévus, plutôt que sur les changements passés, offrant ainsi aux décideurs politiques le moyen de prendre des décisions visionnaires. Cette approche peut aider le gouvernement à déplacer les activités de recherche gouvernementales de programmes indépendants qui répondaient principalement aux mandats individuels ministériels pour en faire un effort concerté et cohérent, mieux adapté pour donner de meilleurs conseils aux décideurs et donc de meilleurs services aux Canadiens.

Le financement du PRDE pour la recherche sur les sources et puits de gaz à effet de serre devrait se terminer en mars 2007, ce qui pose un dilemme. Comment les gestionnaires de recherches devraient-ils désormais fournir l'infrastructure et les ressources fécondes nécessaires pour assurer un tel effort intégré et cohérent permettant de répondre à d'importantes questions stratégiques par l'entremise de priorités de recherche?

Cette question a été posée à un comité composé de plusieurs hauts gestionnaires de programmes de recherches sur le système Terre, issus du gouvernement et d'universités, lors d'un atelier sur le sujet commandité par le PRDE en février 2007 (PRDE, 2007). Parmi les contributeurs figuraient Gordon McBean (Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère; et animateur de la table ronde), Brian Amiro (Université du Manitoba/North American Carbon Program), André Isabelle (Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie), Brian Gray (Environnement Canada/Plan sur les changements climatiques pour les quatre ministères chargés des ressources naturelles) et Wendy Watson-Wright (Pêches et Océans Canada - MPO).

Les commentaires fournis par les participants ont mis en évidence deux très importants points d'entente.

En premier lieu, **les gouvernements et les universités ont des rôles importants et complémentaires à jouer** pour faire avancer la compréhension scientifique des questions environnementales. Les activités scientifiques du gouvernement sont souvent axées sur une préoccupation en particulier et jouent un rôle clé pour aborder les questions courantes de politique publique et prévoir les questions à venir. Par exemple, les excellentes activités scientifiques menées par l'entremise de programmes gouvernementaux comme le PRDE ont été essentielles pour orienter la prise de décisions stratégiques sur les inventaires des émissions de GES, sur la gestion de la forêt et des pâturages ou sur le fait que la fertilisation au fer ne donne pas les résultats attendus. En contrepartie, bien qu'une part du financement de la recherche universitaire soit également stratégiquement axée sur des programmes de partenariat qui visent des questions scientifiques sur les préoccupations clés et viennent donc compléter les laboratoires gouvernementaux, les fonds visent en grande partie la recherche de type « découverte » et la formation académique.

En second lieu, **le suivi à long terme des conditions environnementales est essentiel** à la solidité des recherches scientifiques. Cette activité, combinée au défi de modélisations complexes à grande échelle, nécessite d'importants investissements financiers et en personnel à long terme, et tombe principalement sous la responsabilité de programmes scientifiques gouvernementaux. La surveillance aide à comprendre les « événements » actuels, alors que la modélisation complexe fournit des outils pour projeter des événements qui pourraient survenir. Les études menées dans les universités complètent ces travaux par des projets ciblés à plus courte échéance, qui contribuent à résoudre le « pourquoi » de certaines tendances et à élaborer ou mettre à l'essai les équations de processus et des modèles plus simples utilisés à l'intérieur de modèles plus complexes en tant qu'outils de prédiction.

De plus, afin de revitaliser une initiative de recherche intégrée et cohérente à l'échelle nationale sur les sources et puits de gaz à effet de serre pour la période post-PRDE et de leur fournir les ressources nécessaires, ils ont fait les recommandations suivantes :

- un programme sain, à long terme (sur plusieurs décennies) est considéré comme essentiel. La question est donc de comment y parvenir, et non s'il le faut;
- les hauts gestionnaires de la recherche du gouvernement ont fortement préconisé de protéger les programmes de services votés déjà en place et de procéder à des réinvestissements au-delà de ces montants, à l'aide d'un vaste cadre de travail national sur le système Terre qui prend en compte les multiples avantages pour les priorités des divers intervenants (y compris les changements climatiques, le cycle du carbone et la biodiversité);
- ce dossier doit être constitué dans le cadre d'une collaboration entre les ministères fédéraux responsables des ressources et les universités, en tenant dûment compte des intérêts et des responsabilités des gouvernements provinciaux;
- une telle stratégie de recherche vise une bonne intégration à travers les frontières des disciplines, y compris l'interface terre-océan-atmosphère;
- il faudra aussi examiner si la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) et le Réseau de centres d'excellence peuvent constituer des sources de financement pour des recherches coordonnées ciblées sur le cycle de carbone menées dans les universités; et enfin,
- l'Année polaire internationale (2007-2008) et la publication récente du rapport du Groupe de travail II du GIEC sur les incidences des changements climatiques devraient fournir l'occasion de souligner la nécessité de revitaliser le programme national sur les changements climatiques et le cycle du carbone auprès des décideurs politiques et du public.

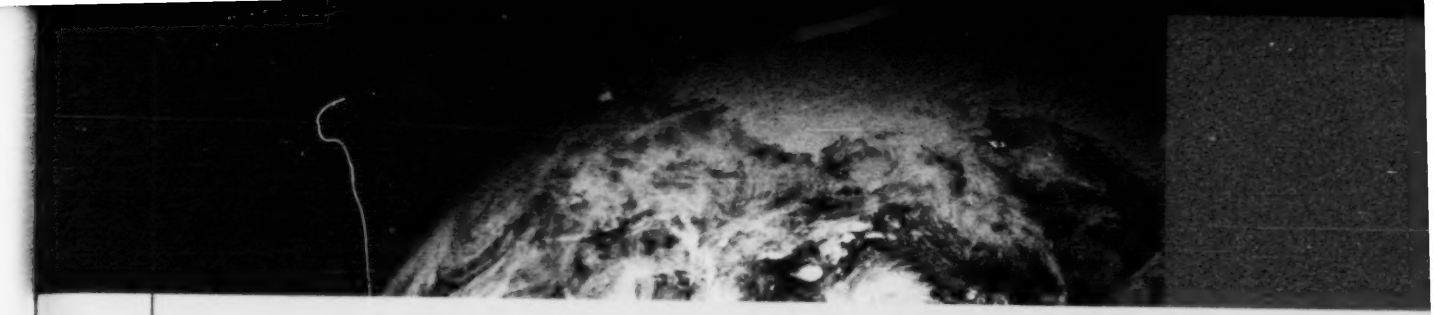
Références

Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.-L., et Bernoux, M. 2007. Soils, a sink for N_2O? A review. *Global Change Biology*, 13: 1-17.

Whitesides, G.M. et Crabtree, G.W. 2007. Don't forget long-term fundamental research in energy. *Science*, 315: 796-798.

Grace,B. et Butts,R.A. 2007. Strengthening government science: Linking disciplines and departments. Presentation, PERD 6.2.1 Final Workshop, Ottawa, Feb. 21-23, 2007.

GEIC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (dir.)). Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York, NY, USA, 996 pp.



ACRONYMES, ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES CHEMIQUES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
APGES	Amélioration des puits de gaz à effet de serre
BRDE	Bureau de la recherche et du développement énergétiques
C	Carbone
CCCmaC	Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCT	Le Centre canadien de télédétection
CFC	Chlorofluorocarbures
CH_4	Méthane
CID	Carbone inorganique dissous
CO_2	Dioxyde de carbone
COD	carbone organique dissous
COP	Carbone organique particulaire
COS	Carbone organique du sol
EC	Environnement Canada
ECC	Équipe nationale de comptabilisation du carbone
EDDD	Eau de déversement du détroit du Danemark
EML	Eau de la mer du Labrador
EPNEA	Eau profonde nord-est-atlantique
FACE	Le projet *Free-Air Carbon Dioxide Enrichment*
FLUDEX	FLooded UplanD Experiment, ou Experience des hautes terres inondées
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLOBEC	Dynamique des écosystèmes océaniques mondiaux
Gt	milliards de tonnes métriques
JGOFS	Étude conjointe sur les flux océaniques mondiaux
MBC-SFC	Modèle du bilan du carbone pour le secteur forestier canadien
MOD	Matière organique dissoute
MPG	Meilleures pratiques de gestion
MPO	Pêches et Océans Canada
N_2	Azote moléculaire
N_2O	Oxyde de diazote

NH_4^+	Microbienne de l'ammonium
NO_3^-	Nitrate
NO_x	Oxydes d'azote
PNC	Production nette de CO_2
PNE	Production nette de l'écosystème
PNO	Programme au niveau de l'objectif
Ppm	Parties par million
PPN	Production primaire nette
PRDE	Programme de recherche et de développement énergétiques
RLE	Région des lacs expérimentaux
RNCan	Ressources naturelles Canada
SCF	Service canadien des forêts
SERIES	Subarctic Ecosystem Response to Iron Enrichment Study, ou Étude de la réponse de l'écosystème subarctique à un enrichissement en fer
SNSCPRCF	Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts
SOLAS	Étude de l'océan superficiel et de la basse atmosphère
SOO	Navires occasionnels
SOP	Station océanique P
SSCR-AgCan	Système de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports sur les gaz à effet de serre d'origine agricole du Canada
UQAM	l'Université du Québec à Montréal
UTCAT	Utilisation des terres et du changement d'affectation des terres
WOCE	Expérience sur la circulation océanique mondiale